

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

GEOHERMAL ENERGY

Edward R. Berman

NOYES DATA CORPORATION

Park Ridge, New Jersey London, England
1975

Э. Берман

ГЕОТЕРМАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ

*Перевод с английского
под редакцией д-ра геол.-мин. наук
Б. Ф. МАВРИЦКОГО*

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»
МОСКВА 1978

Книга содержит обзор новейших достижений в области изучения и использования геотермальной энергии в США и некоторых других странах. Большое внимание уделено вопросам преобразования тепловой энергии нагретых "сухих" пород, методам и технологии создания искусственных циркуляционных систем — "тепловых котлов", в том числе с помощью ядерных взрывов. В книге содержатся данные по бурению самых глубоких скважин в мире и рассматриваются методы совершенствования современного бурения. Рассматриваются также вопросы борьбы с сопеотложением и коррозией при использовании термальных вод различного состава и минерализации, включая горячие рассолы. Значительное место уделено экономическим и правовым вопросам и вопросам охраны окружающей среды при использовании геотермальных ресурсов.

Книга представляет интерес для геологов, гидрогеологов, горных инженеров, инженеров-нефтяников, инженеров по бурению глубоких скважин, теплотехников, энергетиков и экономистов, специализирующихся по геотермальным исследованиям и разработкам. Она может быть также полезной всем читателям, интересующимся вопросами изучения и использования глубинного тепла Земли.

Редакция литературы по новой технике

Copyright © 1975 by Novosibirsk State University

с изменениями, "Мир", 1978

АН

...ая энергия

Ст. научный редактор О. Вишнякова, Мп. научный редактор Т. Богданова, Художник А. Генкель, Художественный редактор Л. Безрученков, Технические редакторы М. Ван Энгеланд, Л. Тихомирова, Корректор И. Максимова

ИБ № 1029

Подписано к печати 8/IX-78 г. Бумага офсетн. № 1 60×90¹/₁₆ = 13,00 бум. л. Печ. п. 26,00. Уч.-изд. п. 25,59. Изд. № 20/9525. Тираж 1500 экз. Цена 3р. 20 к.

Зак. 14650

Издательство "Мир", Москва, 1-й Рижский пер., 2

Типография издательства «Калининградская правда», г. Калининград (обл.), ул. Карла Маркса, 18.

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА ПЕРЕВОДА

При современном бурном развитии энергетики в промышленно развитых странах возрастающая потребность в тепле и электроэнергии может привести в обозримом будущем к исчерпанию или к катастрофическому истощению ресурсов традиционных видов топлива. Поэтому вполне естественно, что научная и инженерная мысль направлена ныне на изыскание новых видов энергии, которые смогут заменить традиционное топливо или сократить его расход. Одним из таких новых видов энергии является глубинное тепло Земли.

В СССР и за рубежом проводятся широкие исследования ресурсов геотермальной энергии, ее видов, способов добычи и использования на различных теплоэнергетических установках. В ряде стран для получения тепла и выработки электроэнергии достаточно широко используются подземные термальные воды, однако запасы этих вод весьма ограничены и их тепловой потенциал в промышленно развитых странах, таких, как СССР, США, Япония, Италия и др., лишь в малой степени сможет удовлетворить насущные потребности.

Несравненно более крупные ресурсы тепла заключены в блоках нагретых практически сухих пород, но освоение этого вида тепла представляет собой крупномасштабную и весьма сложную научно-техническую проблему. В СССР и США имеются теоретические разработки по технологии извлечения этого вида тепла, но до настоящего времени из-за ряда технических трудностей еще не было создано ни одной промышленной установки для извлечения тепла из сухих пород. Существует лишь одна небольшая опытная циркуляционная установка, созданная Лос-Аламосской лабораторией в США. Поэтому публикация материалов, обобщающих проводимые в США исследования по освоению тепла сухих пород, должна привлечь внимание советских специалистов, занятых геотермальными исследованиями и разработками.

В данной книге обобщены обширные и не всегда доступные для советского читателя материалы по технологии извлечения и использования геотермальной энергии. Впервые в советской печати подробно рассматривается Плоушерская программа создания крупных искусственных циркуляционных систем путем применения ядерных взрывов в толще горячих пород. Рассмотрены проблемы бурения под ядерные заряды, результаты ядерных взрывов, вопросы безопасности и методы извлечения тепла из искусственно созданной трещиноватой области. Описаны другие методы создания циркуляционных систем в нагретых практически сухих породах, охарактеризованы технологические трудности и ограничения. Значительное место уделено экономике создания искусственных систем и определению стоимости получаемой при этом электроэнергии.

Рассмотрены также способы получения энергии на базе горячих геотермальных растворов, часто имеющих рассольную концентрацию, как, например, в Солтонской впадине в США.

Наконец, приведена программа работ, предложенная конференцией по исследованию геотермальных ресурсов, состоявшейся в 1972 г. Конференция проводилась с целью оценки современного развития геотермальных исследований, составления рекомендаций по дальнейшим исследованиям и разработкам и определения места геотермальных ресурсов в обеспечении страны дополнительной энергией, минеральными солями и водой.

Можно надеяться, что настоящая книга окажется полезной для специалистов, работающих в области изучения и использования геотермальных ресурсов.

По согласованию с фирмой книга на русском языке издается в сокращенном варианте. Фактический материал гл. 1 обновлен по состоянию на 1977 г.

Перевод книги выполнен кандидатами технических наук В.С. Зродниковым (гл. 3 (часть), 4, 6) и В.И. Кабаковым (гл. 1, 2, 7) и кандидатом филологических наук Н.И. Шаховой (гл. 3 (часть), 5, 8).

Б. Мазрицкий

ПРЕДИСЛОВИЕ

Публикуемый обзор технологии производства энергии основан на исследованиях, проведенных промышленными и техническими фирмами и научно-исследовательскими коллективами университетов под опекой различных правительственных и административных организаций.

В нем содержится подробное описание природы геотермальных ресурсов, их размеров и современной технологии, которая позволяет эксплуатировать этот природный источник энергии и использовать его с наибольшей выгодой.

В книге собраны важнейшие данные из труднодоступных источников. Приведено описание важных энергетических систем, работа которых иллюстрируется примерами ныне действующих электростанций. Такая концентрированная информация сможет послужить прочной основой для осуществления мер по использованию энергии из геотермальных источников. В связи с ростом цен на нефть и интенсивными поисками новых источников энергии геотермальные ресурсы и производимая на их основе электрическая энергия будут представлять несомненный интерес.

Новые методы создания и производства книг, освоенные фирмой "Нойес дейта", позволяют предоставить читателю новую книгу в прочном переплете за максимально короткий срок. Разработана специальная технология, которая сокращает разрыв между стадией работы над рукописью и стадией выпуска готовой книги. Технология современного промышленного производства развивается столь быстро, что прежние проверенные временем операции, такие, как обычный набор, переплет и доставка книг, более неприемлемы. Издатели сумели преодолеть обычные временные задержки, связанные с опубликованием книги, и дали читателю возможность познакомиться с наиболее полной современной информацией по данному вопросу.

Оглавление построено таким образом, чтобы служить одновременно предметным указателем и облегчить поиск информации, содержащейся в данной книге.

ВВЕДЕНИЕ

Первая промышленная геотермальная электростанция была построена в 1904 г. в Лардерелло (Италия). В пятидесятые годы начались разработки геотермальных месторождений в Новой Зеландии. В настоящее время действуют ГеоТЭС в Японии, Мексике и СССР. В США первая промышленная ГеоТЭС была построена в Долине Больших Гейзеров (шт. Калифорния) в 1960 г.

Геотермальные месторождения подразделяются на три типа: месторождения сухого пара, горячей воды и нагретых сухих пород. Месторождения горячей воды в свою очередь подразделяются на месторождения перегретой воды (влажного пара) и месторождения воды с более низкими температурами. Примерами месторождений сухого пара являются Лардерелло и Долина Больших Гейзеров; месторождения Уайракей и другие в Новой Зеландии относятся к типу месторождений перегретой воды.

Помимо производства электроэнергии, возможными побочными продуктами являются природный газ, минеральное сырье и опресненная вода.

Большинство специалистов сходятся во мнении, что геотермальная энергия оказывается конкурентоспособной с другими источниками энергии в отношении стоимости и воздействия на окружающую среду.

1

ГЕОТЕРМАЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ КАК ОДИН ИЗ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Эта глава содержит материалы отчета [1], выполненного в Лос-Аламосской научно-исследовательской лаборатории университета шт. Калифорния.

Объем Земли составляет примерно 1085 млрд. куб. км, и весь он, за исключением тонкого слоя земной коры, имеет очень высокую температуру. Сколько тепла заключено внутри Земли — неизвестно, однако, если судить по извержениям лавы, а также по таким менее явным проявлениям, как термальные источники, гейзеры и фумаролы, его вполне достаточно, чтобы обеспечить большую часть человечества необходимой энергией. Если при этом учесть объем внутренней части Земли и теплоемкость пород, то станет ясно, что геотермальная теплота представляет собой несомненно самый крупный источник энергии, которым в настоящее время располагает человек. Причем эта энергия в чистом виде, так как она уже существует как теплота, и поэтому для ее получения не требуется сжигать топливо или создавать реакторы.

В некоторых районах природа сама доставляет геотермальную энергию к поверхности в виде пара или перегретой воды, вскипающей и переходящей в пар при выходе на поверхность. Природный пар можно непосредственно использовать для производства электроэнергии. Имеются также районы, где термальными водами из источников или скважин можно обогревать жилища и теплицы, а также использовать их для обеспечения энергией низкотемпературные химические процессы. Однако в целом, особенно с учетом величины глубинного тепла Земли, использование геотермальной энергии в мире пока крайне ограничено.

В настоящее время имеются идеи и техническая база для изменения сложившейся ситуации. Вполне вероятно, что через несколько лет геотермальная энергия станет, наконец, широко доступной, причем с точки зрения финансовых затрат, предпринимаемых усилий и проблем

защиты окружающей среды это будет соответствовать возможностям человечества. Тогда этот давно известный вид энергии окажет значительное влияние на решение двух основных мировых проблем: исчерпание запасов природных топлив и неконтролируемое загрязнение окружающей среды.

При непосредственном использовании природного пара или пара, образующегося при вскипании перегретой воды, для производства электроэнергии от него отделяют твердые частицы путем пропуска пара через сепаратор и затем направляют его в турбину. "Стоимость топлива" такой электростанции определяется капитальными затратами на продуктивные скважины и систему сбора пара и является относительно невысокой. Стоимость самой электростанции при этом также невелика, так как последняя не имеет топки, котельной установки и дымовой трубы. В таком удобном естественном виде геотермальная энергия является экономически выгодным источником электрической энергии. К сожалению, на Земле редко встречаются выходы природного пара или перегретых вод, вскипающих с образованием достаточного количества пара.

Гораздо более распространенными являются естественные подземные бассейны термальных вод с температурами, меньшими температуры кипения. Именно они образуют многочисленные термальные источники. В течение тысячелетий люди использовали их для восстановления сил и лечения, в религиозных обрядах и для бытовых нужд. В настоящее время термальные воды с экономической выгодой применяются для обогрева жилищ, теплиц, курортов, а иногда и целых фабрик, рудников и даже городов. В целом термальные воды можно рассматривать как дешевый источник низкопотенциальной тепловой энергии, а их использование имеет много преимуществ, позволяя сберечь высокопотенциальную тепловую энергию для более нужных целей и снижая загрязнение окружающей среды.

Природные горячие воды с умеренными температурами, значительно превышающими температуру кипения, но не настолько, чтобы быть экономически выгодным источником пара для обычных тепловых электростанций, встречаются в больших количествах в нескольких районах мира, в частности в долине Импириал-Валли (шт. Калифорния, США). Однако эти воды используются лишь в отдельных районах главным образом для обогрева помещений. Техника, необходимая для использования такого большого источника геотермальной энергии, быстро развивается. Имеются демонстрационные установки, которые опресняют растворы и производят электроэнергию с помощью

турбин, работающих на паре низкокипящих органических жидкостей. Одна из таких демонстрационных установок мощностью 10 МВт в Импириал-Валли начала действовать летом 1976 г. [2].

Пока, к сожалению, не существует даже демонстрационных установок, извлекающих энергию из горячих "сухих" пород, которые составляют большую часть земной коры. Из-за отсутствия проницаемости и поступлений подземных вод они не дают пока необходимых количеств пара или горячей воды. Однако такие резервуары энергии столь обширны, столь доступны и во многих случаях имеют столь высокую температуру, что, наконец, привлекли серьезное и заслуженное внимание [3, 4]. В частности, соответствующая экспериментальная система создается в Лос-Аламосе (США). Здесь образована большая гидравлически связанная система, для чего пробурены две скважины на глубину ~ 3 км, где температуры пород составляют 200–250°C. Через одну скважину будет под большим давлением закачиваться вода. Через вторую скважину, пробуренную после определения размера, формы и ориентации структуры трещин, будет извлекаться горячая вода. Предполагается, что система в течение долгого времени сможет обеспечивать работу электростанции мощностью ~100 МВт [4].

История освоения геотермальных ресурсов

Использование человеком природных геотермальных вод для обогрева восходит к доисторическим временам. И тем не менее лишь в последние годы оно приняло широкий размах, особенно в Исландии, Венгрии и СССР. Впервые промышленное использование природного пара в больших масштабах началось в 1904 г. в Италии, в Лардерелло, где с помощью подземного пара вырабатывается электроэнергия. Освоение геотермального региона в Уайракее (Новая Зеландия), где используется образующийся при вскипании пар, началось приблизительно в 1950 г. В США промышленное производство электроэнергии осуществляется только на геотермальной электростанции (ГеоТЭС) "Большие Гейзеры" (шт. Калифорния). Первый энергоблок был введен в эксплуатацию в 1960 г., а к концу 1977 г. действовало уже 15 таких энергоблоков.

Большая геотермальная электростанция на перегретой воде работает с 1973 г. в Серро-Прието в северо-западной части Мексики. Небольшие ГеоТЭС имеются в Патэ в Мексике, а также в Италии, Японии, СССР, Новой Зеландии, Исландии и других странах. В мае 1973 г. общая установленная мощность ГеоТЭС мира не превышала

Таблица 1.1

Мощности ГеоТЭС [5, 6]

Страна	Область, город, поселок	Мощность действующих ГеоТЭС, МВт		Ожидаемая мощность ГеоТЭС в 1977 г., МВт
		1972 г.	1975 г.	
США	Долина Больших Гейзеров	192	502	718
Италия	Лардереппо	358,6	380,8	
	Травале		15	
Новая Зеландия	Монте-Амиата	25,5	22	
	Уайракей	160	192	
	Каверву	10	10	
Мексика	Бродлендс			150
	Серро-Прието		75	140
Япония	Патэ	3,5	3,5	
	Мацукава	22	20	
	Отаке	13	13	
	Онума		10	
	Оникобе		25	
	Хачобару			50
СССР	Такиноуэ			50
	Паужетка	5	5	
Испания	Паратунка	0,7	0,7	
	Намафьядль	2,5	2,5	
Турция	Крафла			55
	Кизильдер		0,5	3
Филиппины	Тиви			100
Сальвадор	Ауачапан		30	60
Всего		792,8	1306,8	

800 МВт, т.е. была меньше мощности одной большой тепловой или атомной электростанции. Но уже в 1975 г. их общая мощность достигла 1300 МВт (табл. 1.1). Почти на всех этих электростанциях используется сухой природный пар или влажный пар, образующийся при вскипании перегретой воды.

В настоящее время во многих странах мира проводятся интенсивные изыскания и освоение новых месторождений природного пара и перегретой воды. Они представляют несомненный интерес как экономически выгодные источники энергии. Однако маловероятно, что будет обнаружено много таких месторождений или что некоторые из них будут превосходить уже известные месторождения. Поэтому мож-

но предположить, что при современном уровне техники геотермальные источники энергии никогда не смогут удовлетворить значительную часть общей потребности в энергии как отдельных стран, так и всего мира. Предполагается, что к 1980 г. мощность всех ГеоТЭС мира достигнет 2500 МВт, что составит менее 1% общей мощности всех электростанций [7]. Если, однако, предположить, что при существующем уровне техники будут развиваться новые виды разработок геотермальной энергии или что сама техника будет совершенствоваться, то прогнозы относительно будущего геотермальной энергии станут более оптимистическими.

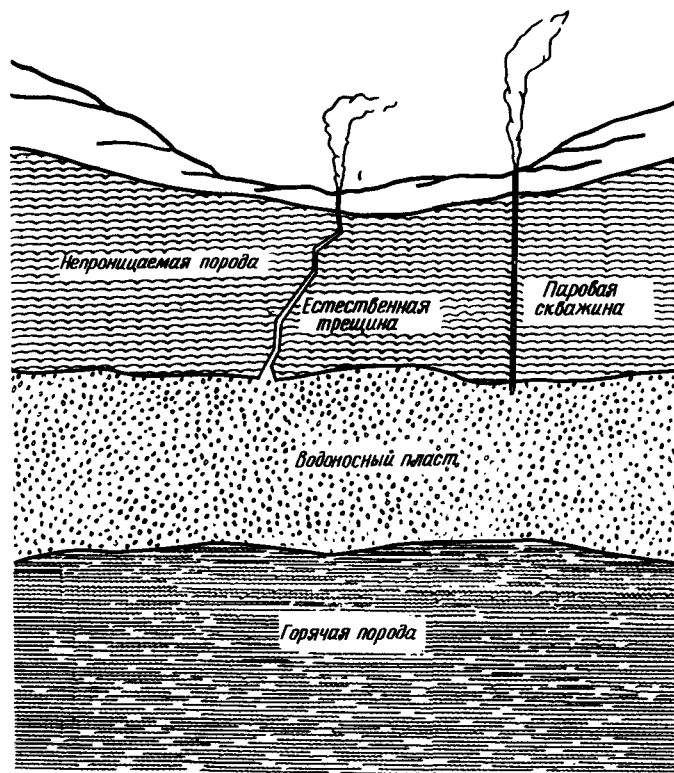
Характеристики систем

До сих пор имеются неясности в отношении гидротермальных месторождений, связанные, например, с естественным движением воды и конвективной циркуляцией в них, с особенностями переноса тепла и геологии. Однако их общая природа теперь достаточно хорошо известна (фиг. 1.1).

Чтобы гидротермальное месторождение образовалось и существовало, очевидно, требуется наличие трех литологических показателей:

- 1) большой объем на глубине достаточно горячих горных пород, являющихся основным источником тепла;
- 2) водоносный пласт или проницаемая формация над ними, через которые подземные воды достигали бы породы и внутри которых теплоноситель (пар, горячая вода или их смесь) циркулировал бы под действием конвекции и переносил теплоту на более высокий уровень;
- 3) непроницаемый слой, или чехол, над водоносным пластом, предотвращающий выход на поверхность значительных количеств теплоносителя, что могло бы в течение тысячелетий привести к значительному охлаждению системы, которая перестала бы представлять интерес как источник энергии. Такой чехол во многих случаях образуется в результате закупорки первоначально проницаемой формации минеральными солями, растворенными на глубине и затем осевшими в холодной породе вблизи поверхности.

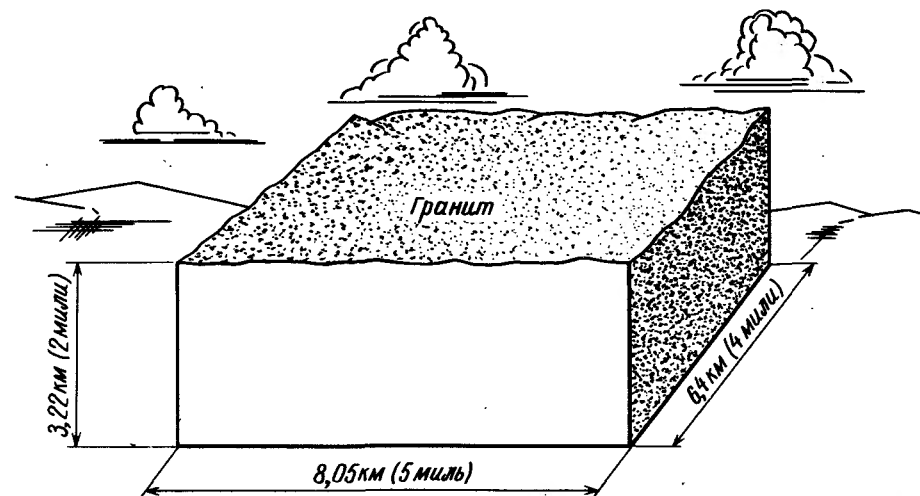
Если теплоноситель, циркулирующий в верхней части водоносного пласта, является паром, то такое месторождение называется системой с преобладанием пара. Если же температура более низкая, а давление и концентрация растворенных солей более высокие, так что циркулирующим теплоносителем является вода или раствор, то такое месторождение называется системой с преобладанием жидкости [8].



Фиг. 1.1. Схема гидротермального месторождения [1].

Подтверждением существования на глубине гидротермального месторождения является обычно наличие на поверхности термальных источников, гейзеров или фумарол. Однако в настоящее время полагают, что многие гидротермальные месторождения могут существовать и без таких проявлений. Изыскание таких скрытых месторождений представляет весьма трудную задачу.

Тепловая энергия существует в горячих породах, даже когда над ними не расположено проницаемое образование и не существует циркулирующего теплоносителя, переносящего теплоту к поверхности земли. В ряде мест, например на Гавайских островах и в других районах недавнего вулканизма, очень горячие породы расположены

Фиг. 1.2. Энергия, извлекаемая из 167 км^3 (40 куб. миль) породы при ее охлаждении на 200°C [1].

$\rho = 2700 \text{ кг/м}^3$; $C_p = 0,8 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}$; $H_v = 2,13 \text{ мкДж/(см}^3 \cdot \text{K)}$. Для 167 км^3 , охлаждаемых на 200°C , $\Delta H = 7,1 \cdot 10^{19} \text{ Дж}$.

близко к поверхности Земли, а количество содержащейся в них энергии велико. При значениях параметров, указанных в подписи к фиг. 1.2, при охлаждении 167 км^3 породы на 200°C высвободится энергия, соответствующая потребности в ней США в 1970 г. В своем первоначальном виде эта энергия, конечно, не может быть использована для плавления руды или сообщения силы тяги самолету. Тем не менее ее можно использовать для многих практических целей, экономя при этом энергию высокотемпературных источников. И хотя объем пород в 167 км^3 значителен, эта цифра представляется бесконечно малой величиной по сравнению с объемом Земли или даже по сравнению с той относительно небольшой частью этого объема, которая заключена в пределах, доступных для обычного бурения.

В настоящее время методы извлечения и использования влажного и сухого пара для производства электроэнергии достаточно хорошо разработаны и продолжают совершенствоваться. Интенсивно развиваются методы использования низкотемпературных термальных вод и концентрированных растворов. Начата разработка способов извлечения энергии из широко распространенных сухих геотермальных месторождений.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

С экономической точки зрения наиболее перспективны геотермальные месторождения с преобладанием пара, которые дают сухой, т.е. перегретый, пар с некоторым количеством различных газов и воды, причем последнюю они могут и не содержать. Помимо механического удаления частиц пыли и осколков породы на выходе из скважин, другой обработки пара обычно не требуется, и пар непосредственно подводится к турбине для выработки электроэнергии. В настоящее время в промышленной эксплуатации находятся месторождения сухого пара в Лардерелло (Италия), Долине Больших Гейзеров (США) и Мацукаве (Япония).

В Монте-Амиата (Италия) эксплуатируются два небольших, но все же экономически выгодных месторождения сухого пара. Месторождения такого же типа осваиваются под руководством ООН в некоторых районах Африки, а также Центральной и Южной Америки. После разведки месторождений сухого пара промышленные организации и правительства стремятся ускорить их освоение и приступить к их использованию.

Значительно более распространенными, чем месторождения сухого пара, являются месторождения с преобладанием жидкости или перегретой воды, дающие влажный пар. В таких месторождениях температура на глубине превышает обычную температуру кипения на поверхности, но вода или раствор в бассейне находятся под давлением, превышающим атмосферное, и поэтому не кипят. При выходе жидкости на поверхность ее давление падает, и она вскипает, так что из скважины поступает смесь пара и горячей воды. Обычно лишь 20% жидкости переходит в насыщенный (влажный) пар, и только этот пар используется для производства электроэнергии. Горячая вода при температуре кипения, составляющая остальные 80%, обычно не используется.

Месторождения влажного пара такого типа эксплуатируются в настоящее время в Уайракее и Бродлендсе (Новая Зеландия), а также в Японии, Мексике и Исландии. К этому же классу месторождений относятся месторождения горячей соленой воды в Импириал-Валли (шт. Калифорния) и Серро-Прието на северо-западе Мексики.

Еще более распространены месторождения термальных вод с температурой ниже температуры кипения. В Советском Союзе на Камчатке имеется небольшая электростанция, на которой используются природные термальные воды при температуре 81°C для испарения

фреона, пары которого поступают в турбину. Аналогичная двухкомпонентная система с изобутаном вместо фреона действует в долине Импириал-Валли [2]. Существует также двухконтурная геотермальная установка в районе Пекина (КНР), работающая на источнике с температурой 86°C и использующая в качестве вторичного теплоносителя хлористый этил [9]. Обычно природные термальные воды, имеющие температуры ниже точки кипения, используются для обогрева помещений и для обеспечения энергией низкотемпературных процессов.

Наиболее распространены сухие геотермальные месторождения, не содержащие ни пара, ни горячей воды, либо потому, что они непроницаемы для воды, либо потому, что при циркуляции подземные воды их не достигают. В принципе сухие горячие породы, имеющие высокую температуру и являющиеся потенциальным источником энергии, можно обнаружить в любой точке земного шара путем бурения достаточно глубоких скважин. Однако на практике с ростом глубины скважин трудности бурения и его стоимость возрастают по экспоненте. В настоящее время обычные скважины достигают глубины 6000 м, но даже небольшое увеличение этой глубины связано со значительными трудностями.

Поэтому при существующих методах бурения представляют интерес лишь сухие геотермальные месторождения, расположенные на глубинах не более 6000 м от поверхности Земли. Эти месторождения значительно отличаются по температурам и доступности. В предельных случаях это могут быть скопления горячей лавы, расположенные у поверхности и имеющие температуры выше 1100°C, и области интенсивного охлаждения, сравнительно молодые в геологическом отношении и даже на глубине 6000 м имеющие температуру породы менее 150°C. Пока не существует экономически выгодного метода извлечения энергии из сухих горячих пород в земной коре. Ниже будет рассмотрен ряд предложенных для этого решений.

РАЗМЕЩЕНИЕ И ДОСТУПНОСТЬ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Известно, что месторождения сухого пара с запасами, достаточными для промышленного использования, существуют менее, чем в двенадцати районах мира, являющихся в основном районами недавнего вулканизма. При систематической разведке, вероятно, можно открыть еще несколько десятков таких месторождений. Но следует признать, что как геологические, так и термические условия, приво-

дящие к образованию месторождения с преобладанием пара, возникают достаточно редко, а сами месторождения обычно невелики.

Системы с преобладанием жидкости, обеспечивающие достаточное для промышленного использования количество влажного пара, значительно больше по размерам и встречаются чаще. Они расположены во многих районах мира и представляют собой очень большой по размерам и сравнительно легко доступный источник энергии.

Еще более распространенными и более доступными являются низкотемпературные воды. Самым же большим и самым доступным хранилищем геотермальной энергии являются сухие горячие горные породы.

ОЦЕНКИ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ

Проведенные к настоящему времени оценки количества энергии, заключенной в уже эксплуатируемых месторождениях с преобладанием пара и с преобладанием жидкости, весьма различны и зависят от степени оптимизма лиц, определяющих границы и оценивающих долгосрочные продуктивности этих месторождений, а также предсказывающих открытие новых месторождений и предлагающих методы, ведущие к более широкому их освоению.

Согласно одной достаточно умеренной оценке [5], при существующем уровне техники выявленные и доступные для извлечения ресурсы природного пара в США обеспечат выработку 1000 МВт в течение 50 лет, а открытия новых месторождений пара, вероятно, позволят обеспечить получение 3000–6000 МВт также в течение 50 лет.

Существуют другие оценки и прогнозы, согласно которым предполагаемые запасы геотермальных месторождений природного пара США в 5–10 раз больше указанных величин. Но даже по самым оптимистическим оценкам при использовании только современных методов освоения и эксплуатации месторождений, геотермальные ресурсы будут удовлетворять лишь малую часть всей потребности США в энергии.

Вопрос о том, насколько могут возрасти эти ресурсы энергии при совершенствовании современных методов, является предметом многих обсуждений. Большинство специалистов в данной области считают, что в течение последующих 5–10 лет будут достигнуты следующие успехи.

1. Значительно будут усовершенствованы методы разведки месторождений, пригодных для немедленного использования, благодаря чему будет открыто гораздо больше

месторождений, чем можно предположить в настоящее время.

2. Будут разработаны более совершенное буровое оборудование и новые бурильные системы, что приведет к снижению стоимости изыскания, освоения и эксплуатации месторождений на обычных глубинах и сделает доступным и экономически оправданным источником энергии значительно более глубокие месторождения.

3. Будут устранены трудности химического порядка, связанные с использованием относительно концентрированных горячих растворов, типа имеющихся в долине Импириал-Валли, что позволит увеличить снабжение перегретой водой, требуемой при производстве электроэнергии.

4. Будет доказана эффективность двухкомпонентных схем, в которых тепло природных термальных вод передается кипящим при низких температурах органическим жидкостям, что позволит использовать низкотемпературные гидротермальные месторождения для производства электроэнергии.

5. Будет расширено использование тепла природных термальных вод (а также вод, сбрасываемых после охлаждения и конденсации тепловыми электростанциями) для бытовых и промышленных целей, кондиционирования, опреснения воды, очистки бытовых и промышленных сточных вод, извлечения минеральных солей, а также для физических и химических процессов.

6. Будут выяснены многие вопросы, связанные с геологией, гидрогеологией, тепло- и массообменом, химическими и механическими процессами, а искусственная стимуляция геотермальных месторождений всех типов приведет к значительному увеличению их продуктивности.

Количество используемых геотермальных ресурсов возрастет пропорционально степени реализации каждого из указанных технических достижений и очень возможно, что в последующие 10 лет оно увеличится в 20 раз. По оценкам Пека и др. [5], благодаря этим достижениям геотермальные ресурсы США возрастут до таких размеров, что они смогут обеспечить выработку приблизительно 440 000 МВт в течение 50 лет помимо других применений. Предположения об общем пятидесятикратном увеличении можно найти и в других источниках, однако только лишь оценка Пека и др. превышает современную установленную мощность электростанций США.

Можно увеличить геотермальные ресурсы, разработав новые методы экономически выгодного извлечения тепла из сухих горячих пород. Размеры этого роста зависят главным образом от предположений относительно типов и размеров геологических структур, в которых могут быть созданы энергетические системы, минимальной температуры пород, при которой использование геотермальной энергии становится эффективным, максимальной глубины, до которой экономически выгодно расширять месторождение, затрат, связанных с геохимическими и другими присущими таким системам проблемами, и предполагаемого срока эксплуатации системы.

Вполне вероятно, что станет выгодным использование пород с температурами до 150°C ; обычными методами будут освоены глубины до 6 км; проблемы, присущие таким системам, и расходы не превзойдут имеющие место при использовании горячих растворов, а срок эксплуатации систем будет не менее 20 лет. При таких предположениях сухие геотермальные месторождения США обеспечат производство многих миллионов мегаватт по крайней мере в течение века. Но если даже в действительности будет извлечен только 1% этой энергии, то и тогда будет удовлетворена основная часть потребностей США в энергии. Все это существенно стимулирует разработку необходимой техники.

ВИД ИЗВЛЕКАЕМОЙ ЭНЕРГИИ

Непосредственно извлекаемым видом энергии любой геотермальной системы является теплота, обычно содержащаяся в паре или горячей воде. Если при этом температура достаточно высока, то тепловую энергию можно использовать для привода турбины, винтового роторного расширителя (см. [6], т. 3, стр.1925–1935) или какого-либо другого теплового двигателя, а полученную механическую энергию — для производства электроэнергии или совершения другой полезной работы. При таких или более низких температурах теплота может использоваться непосредственно для обогрева помещений, кондиционирования воздуха, дистилляции, обеспечения энергией химических процессов и многих других целей. Системы многократного использования, в которых теплота при более высоких температурах может сначала использоваться для производства электроэнергии, а затем для бытовых и промышленных целей, представляются особенно перспективными.

ЗНАЧЕНИЯ К.П.Д.

Хотя температуры естественных геотермальных теплоносителей изменяются в широких пределах, в целом они ниже 200°C . Эта температура слишком низка для нормальной работы паровой турбины, и к.п.д. преобразования в электрическую энергию оказывается невысоким. Если для системы на сухом паре этот к.п.д. составляет ~20%, то для системы с перегретой водой он составляет всего 15% и менее. К.п.д. существенно возрастет при создании экономических двухкомпонентных установок, используемых автономно или в качестве нижнего цикла при верхнем паровом цикле. К.п.д. также возрастет с ростом температуры воды при создании искусственных систем с сухими породами.

При других применениях, когда вся геотермальная энергия или ее часть используется непосредственно как теплота, возможно достижение более высоких к.п.д., чем при производстве только электроэнергии.

ОГРАНИЧЕНИЯ ПО РАЗМЕРАМ

При современном уровне техники мощности ГеоТЭС невелики и составляют 50–400 МВт. В основном это связано с потерями при подаче по трубам низкотемпературного пара на большие расстояния. Типичная ГеоТЭС работает на паре 10–30 скважин, расположенных в непосредственной близости от нее. Поэтому вместо расширения системы сбора пара и увеличения существующей станции целесообразно построить еще одну небольшую электростанцию, работающую от следующей группы скважин. Недостатки, связанные с созданием таких малых станций, для геотермальной энергетики оказываются менее существенными, чем для большинства других энергетических систем.

Из-за низких температур и давлений используемого пара турбины ГеоТЭС оказываются непропорционально велики относительно производимой мощности, а их наиболее эффективные размеры соответствуют мощности 50 МВт и менее. Оборудование таких станций является компактным и достаточно простым, так как отсутствуют системы подачи топлива и удаления золы, топка и дымовая труба. Соответственно затраты на создание новой небольшой электростанции не намного превышают затраты на увеличение уже существующей станции, а при мощности ~100–150 МВт преимущество такого увеличения уже полностью утрачивается вследствие роста затрат и тепловых потерь при расширении системы сбора пара.

Положение может несколько измениться при освоении гидротермальных систем и систем с сухими породами, в которые закачивается вода под давлением. Выход энергии на одну скважину может существенно возрасти при использовании вместо пара горячей воды, поскольку при одинаковых перепадах давлений и температурах через скважину будет проходить существенно больше жидкости, несущей к поверхности соответственно большее количество теплоты. Кроме того, в отличие от пара горячую воду при умеренных давлениях и температурах можно достаточно эффективно и экономично передавать по трубам на значительные расстояния.

И, наконец, поскольку плотность паров органических жидкостей в двухкомпонентных установках существенно выше плотности водяного пара, то и работающие на них турбины той же мощности будут значительно меньшими по размерам. Поэтому при создании и освоении системы с горячей водой и сухими породами может оказаться экономически выгодным увеличить системы сбора по сравнению с имеющимися в настоящее время для природного пара. В сочетании с ростом тепловой энергии от каждой скважины это приведет к уменьшению числа электростанций и увеличению мощности каждой из них. При использовании же двухкомпонентных схем размеры электростанций сохранятся.

ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ СКВАЖИН И УСТАНОВОК

Продукция каждой геотермальной скважины отличается природой, температурой и количеством теплоносителя, извлекаемого из нее. Причем по геологическим причинам, которые до сих пор до конца не выяснены, она может значительно отличаться даже для соседних скважин одного месторождения. Очень редко одна паровая скважина обеспечивает выработку 20 МВт мощности, а в среднем она обеспечивает менее 10 МВт. Из-за увеличения расхода при поступлении из скважины воды вместо пара указанная средняя величина может стать существенно выше для гидротермальных систем и систем с сухими породами, чем для месторождений природного пара, но это зависит еще от температуры, с которой вода направляется в установку.

ПРОДУКТЫ, ВЫЗЫВАЮЩИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Выходящий на поверхность пар содержит 0,5–5% неконденсирующегося газа. Обычно это двуокись углерода, считающаяся безвредной. Однако он также содержит некоторое количество сероводорода

и незначительные количества других газов, таких, как метан и аммиак. Газы обычно сбрасываются в атмосферу сразу же или после выделения из конденсата в градирнях. Сероводород имеет сильный неприятный запах, и если он собирается в низинах, или на ограниченной площади, то может представлять опасность для людей и животных. По данным, приведенным в работе [10], в ГеоТЭС мощностью 100 МВт за год поступает 100 млн. т воды, которая выносит из недр 100 тыс. т солей хлора, 100–1000 т аммиака, фтора, серной кислоты и 1000–10 000 т сероводорода.

В конденсате обычно находят следы бора, мышьяка и других летучих соединений. Причем, если конденсат попадает в поверхностные воды или в виде капель переносится ветром, то он может представить опасность для растений, а при попадании в корм – и для животных. Обычно конденсат выбрасывается при повышенных температурах, и тогда он является также источником теплового загрязнения.

Согласно данным работы [10], в Сальвадоре, где работает ГеоТЭС мощностью 30 МВт, воду с большим количеством бора отводят по специальному каналу в море, чтобы не отравить находящиеся рядом плантации кофе. В Новой Зеландии 3/4 мышьяка, содержащегося в воде реки Уайкато, попадает туда со сточными водами ГеоТЭС. В рыбе, выловленной ниже по течению от станции, в 4,5 раза больше ртути, чем в рыбе, выловленной выше по течению.

При получении влажного пара из систем с преобладанием жидкости ~20% массового расхода из скважины составляет пар, содержащий упомянутые выше количества примесей. Остальные 80% представляют собой горячую воду с более высокими концентрациями указанных примесей и гораздо более высоким содержанием различных растворенных минеральных солей, особенно карбонатов и кремнезема. Если сброс геотермальной воды осуществляется в поверхностные воды, то это может привести к гибели рыб, животных и растений, а поскольку этот сброс очень велик, то он представляет собой значительно больший источник химического и теплового загрязнения, чем выброс парового конденсата.

В двухкомпонентных системах теплоноситель из скважины поступает в теплообменник и затем снова заканчивается в недра месторождения через вторую скважину. При этом образуется замкнутая циркуляционная система, которая в принципе не загрязняет окружающей среды. Однако при понижении давления и температуры из теплоносителя могут выделяться растворенные в нем газы и минеральные вещества, т.е. возникает проблема их удаления, которую не всегда можно решить закачкой теплоносителя. В целом проблемы загрязнения зна-

чительно легче решаются для систем с перегретой водой и сухими породами, чем для систем природного пара.

Последние, кроме того, создают еще проблему акустического воздействия на окружающую среду, решение которой представляет собой весьма сложную задачу. Вскипание перегретой воды с образованием пара сопровождается интенсивным шумом, который можно заглушить, используя специально спроектированную акустическую камеру. Так как закрытие скважины или изменение расхода через нее происходят быстро и могут повредить ее, то обычно как влажный, так и сухой пар непрерывно стравливают в атмосферу в течение продолжительных периодов времени в процессе испытаний самой скважины и соответствующего оборудования, а также перекрывающих клапанов в других частях системы и бурения скважин для новых станций в непосредственной близости от старых. Это является причиной дополнительного шума.

Можно применять звукогасители, способные понизить уровень шума до приемлемого значения, но эффективные звукогасители очень дороги и быстро выходят из строя под действием частиц пыли, породы, водяных капель и минеральных отложений, выносимых паром. Шум присущ системам с преобладанием пара.

Так как геотермальную энергию обычно получают при сравнительно низких температурах, то ее использование в тепловых машинах малоэффективно. Для ГеоТЭС становится важной проблема сброса тепла, присущая всем другим низкотемпературным энергетическим системам. Малые размеры геотермальных установок позволяют осуществлять распределенный сброс тепла, что до некоторой степени облегчает, но не решает полностью эту проблему.

Таким образом, при использовании геотермальной энергии возникает ряд проблем, связанных с загрязнением окружающей среды, причем некоторые из них присущи и другим способам производства энергии. В целом таких проблем на ГеоТЭС меньше, чем на тепловых и атомных электростанциях, и уже найдены их технические решения. С точки зрения воздействия на окружающую среду, использование геотермальной энергии вызывает наименьшие возражения и несомненно является перспективным.

Следует отметить, что обычно геотермальная энергия обнаруживается в районах с такими поверхностными проявлениями гидротермальной активности, как фумаролы, минеральные термальные источники, а также запахи, шумы, отложения минеральных солей и связанные с ними загрязнения поверхностных вод. При соответствующем усовершенствовании грамотно спроектированной геотермальной энер-

гетической системы можно уменьшить загрязнение до уровня, меньшего первоначального естественного значения.

Проблемы освоения геотермальных ресурсов

Проблемы, связанные с определением местоположения и оценкой запасов месторождений природного пара, аналогичны соответствующим проблемам при разведке нефти и природного газа, и решаются с помощью аналогичных геологических и геофизических методов в сочетании с геохимическими и гидрологическими исследованиями, а также изучением переноса тепла. Однако о месторождениях природного пара и горячих вод известно пока меньше, чем о месторождениях нефти и газа. В частности, неясно, как соотносить данные о геологических структурах и результаты наземных исследований и аэрофотосъемки с наличием подземных бассейнов пара и горячей воды. Основным и решающим, хотя и дорогим, методом разведки остается бурение.

Первое разведочное бурение обычно проводится на глубины всего в несколько десятков или сотен метров с целью определения локальных геотермических градиентов, а также гидрогеологических условий и литологии месторождения. Место бурения обычно определяют исходя из поверхностных проявлений гидротермальной активности, дополняемых геохимическими исследованиями природных вод и конденсатов, измерениями электрического сопротивления по глубине, микросейсмическими исследованиями и результатами, получаемыми другими геофизическими методами. Хотя методы обнаружения геотермальных месторождений интенсивно развиваются, необходимо их дальнейшее совершенствование.

Бурение остается наиболее эффективным методом разведки, оценки запасов, освоения и использования геотермальных месторождений. За исключением случаев, когда существует опасность встретить высокотемпературные теплоносители, разведочное бурение проводится традиционными методами, и поэтому в основном развитие соответствующего оборудования и методов будет заключаться в снижении затрат на бурение разведочных скважин малого диаметра и скважин без обсадки.

Бурение продуктивных скважин связано с особыми трудностями, обусловленными главным образом наличием непрочных пород, высоких температур, давлений и больших расходов теплоносителей, вызывающих коррозию.

Бурение продуктивных скважин в существующих месторождениях пара и горячей воды в настоящее время производится с помощью

более или менее традиционных способов, но сам процесс бурения оказывается трудным, дорогим и опасным, и очень часто буровое оборудование выходит из строя раньше, чем достигается запланированная глубина скважины. Следовательно, для разведки, освоения и использования геотермальных месторождений весьма желательны разработка и создание новых методов бурения и более совершенного оборудования.

Геологические, геофизические и гидрогеологические исследования в скважинах являются основной частью работ по разведке и освоению. Большая часть существующего оборудования для каротажа скважин разработана для нефтяных месторождений и не предназначена для использования при температурах, имеющих место в геотермальных скважинах. Это существенно ограничивает возможность исследований с помощью скважин и получение информации о месторождении. В настоящее время разрабатываются оборудование для каротажа при высоких температурах и соответствующие методы.

Так как до сих пор нет полной ясности в отношении гидротермальных месторождений, то не достигли совершенства ни анализ, ни модели, являющиеся основой диагностики месторождений методом зондирования. Расположение и оборудование для скважин, их дебит, последовательность бурения, а также способы закачки до сих пор выбираются на основе интуиции и имеющегося опыта, а не исходя из действительного понимания физики процессов, и поэтому далеко не оптимальны. Все еще отсутствуют надежные модели месторождений и методы их эксплуатации. Их создание является первостепенной задачей.

Основные геохимические проблемы и связанные с ними проблемы сброса в окружающую среду загрязняющих веществ уже были рассмотрены. В последнее время наметилась тенденция закачивать образующийся конденсат и излишки воды со всеми растворенными в них газами и минеральными солями в продуктивную формацию через непродуктивные или специально пробуренные скважины. При этом почти все химические загрязнения вновь оказываются под землей, и исключается возможность их попадания в поверхностные воды. Месторождение вновь заполняется жидкостью, и опасность оседания поверхности, связанная с извлечением теплоносителя, понижается. Однако это требует дополнительных затрат и связано с риском закупорки породы частицами или осадком, содержащимися в закачиваемой воде, вблизи скважины для закачки.

Коррозия, образование отложений и закупорка бурильного оборудования, обсадных труб и системы труб на поверхности также явля-

ются серьезными проблемами при извлечении из месторождений горячих растворов. Пока не будут разработаны химические методы устранения этих проблем, придется использовать дорогие коррозионностойкие материалы для конструкций наземной части системы и периодически закрывать скважины для очистки или замены оборудования.

В искусственных геотермальных системах с сухими породами в процессе их разработки возникают некоторые трудности, присущие гидротермальным месторождениям, к которым добавляется ряд дополнительных трудностей. Разведка сухих геотермальных месторождений достаточно проста, так как требуется обнаружение только высокой температуры и требуемой литологии. Разведка, разработка месторождения и бурение продуктивных скважин в целом также менее сложны, чем в случае гидротермальных месторождений, поскольку при их проведении не приходится иметь дело с большими давлениями и расходами горячей коррозионно-активной воды или пара, а основным препятствием является лишь высокая температура, которую можно регулировать, обеспечив циркуляцию соответствующего охладителя.

Основными проблемами использования таких месторождений являются инженерные проблемы, связанные с достаточно интенсивным извлечением тепла из сухих горных пород, осуществляемым подходящим способом при стоимости, не превышающей ее значений для других систем. Решающим фактором для этих проблем является низкая теплопроводность таких пород.

При отсутствии отвода тепла поступающей в скважину водой или паром оно должно передаваться через породу теплопроводностью, а это очень медленный процесс. Идея, заключающаяся в опускании через специальную скважину теплообменника для извлечения энергии из недр, практически не оправдана, за исключением редких случаев, когда через формацию, содержащую скважину, проходит мощный горизонтальный поток горячей воды. Если же теплота подводится к скважине только под действием теплопроводности, то тепловой поток столь мал, что даже при извлечении тепла из скважины с максимальным к.п.д. и с нулевыми затратами его будет недостаточно для погашения затрат на бурение скважины. Бурение скважины большего размера существенно не меняет ситуации, так как стоимость бурения возрастает с увеличением диаметра скважины в той же пропорции, что и площадь поверхности полученной скважины.

Чтобы извлечение энергии из сухих горячих пород было экономически выгодным и происходило достаточно интенсивно, необходимо

создать в породе большую площадь теплоотдачи менее дорогими способами, чем бурение множества скважин, а также обеспечить циркуляцию большого объема теплоносителя по всей новой поверхности. Теплоноситель извлекается затем на поверхность и отдает тепло в теплообменнике, после чего он возвращается в подземную циркуляционную систему и вновь "запасается" теплом. Имеется ряд предложений по развитию энергетических систем такого типа.

В засушливых районах и там, где трещиноватые образования перекрыты водонепроницаемыми пластами, расположены горячие породы, в которых не могут образовываться ни перегретая вода, ни пар просто из-за отсутствия воды. В таких случаях не обязательно создавать новую поверхность, а достаточно подать в недра воду, позволить ей просочиться через формацию и затем извлечь ее уже в виде перегретой воды или пара. Методы закачки, аналогичные используемым при вторичной добыче нефти, позволят получить большие количества тепла из такой формации. При этом приходится бурить множество скважин, через некоторые из них закачивать холодную воду, а через другие — извлекать горячую воду или пар.

Так как вязкость горячей воды меньше, чем холодной, то последняя интенсивно вытесняет всю нагретую воду вверх к скважинам и такой способ извлечения тепла оказывается весьма эффективным. Хотя затраты на бурение в подобной системе велики, а время освоения продолжительно, тем не менее при подходящих геологических условиях можно получать большие количества тепла в течение продолжительного времени.

Таким образом, в сухих горячих породах необходимо создавать новую поверхность теплообмена, а также обеспечивать закачку, циркуляцию и извлечение теплоносителя. Один из часто предлагаемых способов создания таких условий состоит в организации взрыва бризантного ВВ в скважине, чтобы раздробить породу вокруг нее, и последующей подаче холодной воды по скважине или по изолированной трубе, установленной в ее центре. Под действием конвекции вода будет циркулировать между обломками породы, а из второй скважины или через кольцевую щель вокруг трубы в той же скважине можно будет извлекать горячую воду или пар. К сожалению, для образования достаточно большого объема раздробленной породы требуется неоправданно большое количество ВВ, что невыгодно из экономических соображений. Поэтому чаще предлагается использовать для этой цели ядерные заряды.

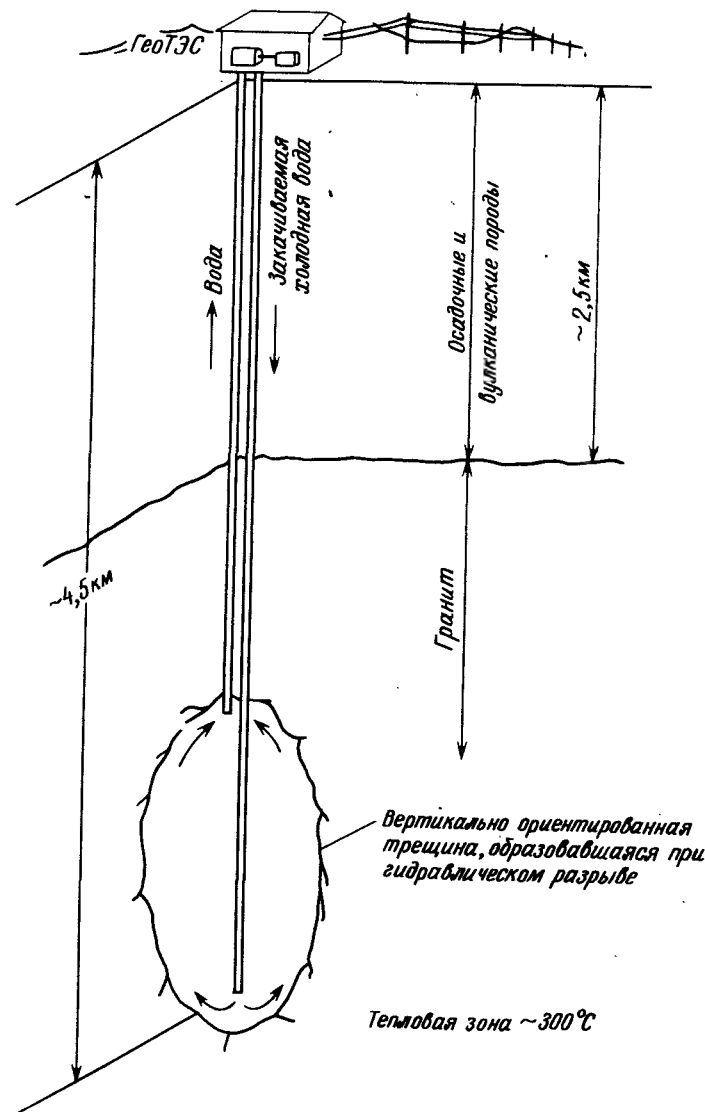
Согласно исследованиям по Плушерской программе [11], использование ядерных зарядов экономически выгодно лишь в случае

последовательного проведения взрывов довольно большого числа мощных ядерных зарядов, расположенных по схеме плотной закладки. Помимо опасности, связанной с постоянным наличием радиоактивных обломков, образовавшихся во время этих взрывов, вызванное ими землетрясение может быть столь сильным, что вряд ли допустимо в большинстве районов мира. Однако можно найти способы решения указанных проблем, и поэтому от такого предложения, содержащегося в Плушерской программе, пока не отказались.

Другой изучаемый в настоящее время метод извлечения тепла из сухих горячих пород состоит в использовании гидроразрыва для образования трещиноватости и поверхности теплообмена (гл. 2). Это стандартный метод подготовки нефтяной или газовой скважины к эксплуатации, применяемый для увеличения проницаемости продуктивных формаций вокруг скважины. Он предусматривает использование высоконапорного насоса на поверхности для создания в скважине давления жидкости, достаточного для растрескивания породы, образования и последующего увеличения разрыва. На фиг. 1.3 схематически показан метод, состоящий в бурении скважины на достаточную для достижения горячей породы глубину и в последующем образовании вокруг скважины большой трещины эллипсоидальной формы. Подземная циркуляционная система организуется затем или путем размещения в той же скважине изолированной трубы, или, как показано на фиг. 1.3, путем бурения второй скважины, достигающей трещины.

Холодная вода, закачиваемая через более глубокую скважину, нагревается, проходя через трещину, ее плотность понижается и она поднимается на поверхность через вторую скважину или через кольцевой зазор вокруг изолированной трубы. Таким образом, циркуляция поддерживается непрерывно без насоса. Охлаждение породы вблизи забоя скважины для закачки жидкости может вызвать растягивающие напряжения, достаточные для образования новых трещин, и следовательно, расширение циркуляционной системы во все стороны. В этом случае увеличение поверхности теплообмена в породе может полностью компенсировать охлаждение поверхности первоначальной трещины. Таким образом, система извлечения энергии будет самовозобновляемой.

Однако существует ряд проблем, связанных с созданием и использованием такой системы. В частности, в горячих кристаллических породах вряд ли можно получить достаточно большой гидравлический разрыв, создание которого возможно лишь при существенном развитии современной техники. Кроме того, очень трудно создать и



Фиг. 1.3. Геотермальная энергетическая система в сухих породах, созданная методом гидравлического разрыва [1].

поддержать достаточно низкое гидравлическое сопротивление взаимосвязанных циркуляционных каналов, чтобы обеспечить циркуляцию большого объема жидкости под действием разности плотностей. Поэтому существует возможность непосредственного попадания холодной жидкости из скважины для закачки в продуктивную скважину. Если трещиноватая формация имеет достаточную проницаемость, то утечка жидкости из системы может быть высокой, что не позволит реализовать описанную выше схему с закачкой воды под давлением.

Указанные трудности можно избежать путем организации вскипания воды с образованием пара на любом заранее выбранном уровне системы. Однако это может создать опасность закупорки системы трещин растворенными минеральными солями и значительно понизить скорость переноса тепла к поверхности через скважину. Другой способ заключается в размещении внутри скважины на некоторой глубине насоса для поддержания в верхней ее части давления, достаточного для предотвращения вскипания, в то время как вся остальная часть системы будет находиться при пониженном давлении. К сожалению, пока не существует насосов для работы при таких высоких температурах.

Возможны другие циркуляционные системы и рабочие схемы для закачки холодной жидкости в сухие геотермальные месторождения и извлечения ее после нагревания в недрах породы. Все такие системы будут полностью замкнутыми и, следовательно, не будут вызывать загрязнения окружающей среды. Однако и для этих систем придется решать те же химические проблемы, в том числе проблемы коррозии, что и для описанных выше систем с природным паром и перегретой водой.

Самыми серьезными проблемами при крупномасштабном освоении геотермальной энергии в США являются не столько рассмотренные выше научные и инженерные проблемы, сколько традиционные проблемы организационного, финансового и юридического плана, которые очень запутаны и сложны. Например, там, где права на землю, минеральные ресурсы и воду разделены, неясно, кто же является владельцем геотермальной энергии и как этот владелец может ее использовать или доставлять потребителю. Большая часть известных геотермальных ресурсов в США расположена на государственных землях, на которых практически невозможно проводить частные изыскания и на которых порядок сдачи земель в аренду только разрабатывается.

Местные законы, законы штатов, а также федеральные законы, налоговые, правовые и уставные системы являются неполными, частично перекрывающимися, а иногда противоречащими друг другу, боль-

шей частью не согласуются между собой и неправильно истолковываются. Юридические требования к коммунальным предприятиям таковы, что надежное долгосрочное снабжение топливом должно быть гарантировано до сооружения новой электростанции. Применительно к геотермальной энергии это требование сводится к тому, что требуемые для ГеоТЭС продуктивные скважины должны быть пробурены и опробованы путем стравливания в атмосферу за месяцы или годы до начала сооружения электростанции. Такая отсрочка в получении прибыли очень затрудняет финансирование геотермальных разработок. В США имеются и другие организационные трудности, задерживающие развитие геотермальной индустрии, и все они в комплексе достаточно сложны.

Оценки стоимости

Основными затратами при разведке, разработке и использовании геотермальных месторождений являются очень высокие расходы на бурение и обсадку трубами глубоких скважин в горячих формациях. Эти затраты до некоторой степени окупаются относительной простотой и невысокой стоимостью расположенной на поверхности установки, использующей глубинное тепло земли. ГеоТЭС не нужны ни топка, ни котельная установка, ни дымовые трубы или дымопоглощающие устройства. Поэтому стоимость 1 кВт установленной мощности на ГеоТЭС мала. Если же глубинное тепло используется непосредственно, например для опреснения воды, то такая установка состоит по существу из систем труб и теплообменников, и стоимость 1 кВт тепловой энергии также мала.

В каждом случае стоимость "топлива" определяется капитальными затратами на сооружение скважин и систем сбора, которые в общем значительно ниже капитальных затрат на получение и обработку ископаемых топлив или топливных элементов. Эксплуатационные расходы и расходы на ремонт обычно также низки, что связано с простотой геотермальных энергетических установок и их работой при сравнительно низких рабочих температурах и давлениях. В целом для обычных геотермальных энергетических систем стоимости установки и тепловой энергии низки.

В США единственные надежные данные по стоимости применительно к геотермальным энергетическим системам получены на ГеоТЭС "Большие Гейзеры" (шт. Калифорния) [1, 12–14]. С использованием этих данных проведены оценки затрат на освоение, сооружение и

Таблица 1.2

Затраты на освоение, сооружение и эксплуатацию ГеоТЭС на природном паре мощностью 110 МВт [1, 14]

	Долл.
Расходы на получение пара	
Скважины (16 скважин, каждая стоимостью 150 тыс. долл.)	2 400 000
Система труб для сбора пара (при стоимости 10 долл./кВт)	1 100 000
Всего	3 500 000
Накладные расходы	
Годовые установленные расходы (14%)	490 000
Ежегодная арендная плата землевладельцам	175 600
Общие годовые расходы	665 600
Стоимость тепловой энергии (10^{-3} долл./кВт·ч)	
Стоимость получаемого пара	0,80
Разведочные работы	0,33
Стоимость сброса	0,02
Общая стоимость энергии	1,15
Стоимость преобразования энергии (10^{-3} долл./кВт·ч)	
Установленные расходы	1,95
Эксплуатационные расходы	0,25
Общая стоимость энергии (10^{-3} долл./кВт·ч)	3,35

эксплуатацию ГеоТЭС на природном паре мощностью 110 МВт (табл. 1.2). Предполагалось, что расходы на изыскательские работы по выявлению месторождения природного пара составят 2 млн. долл. В табл. 1.3 приведены стоимости 1 кВт·ч электроэнергии, производимой на электростанциях различных типов [15]. Эти данные и экономический эффект, полученный при эксплуатации электростанции "Большие Гейзеры", показывают, что ГеоТЭС, работающие на природном паре, являются конкурентоспособными с электростанциями других типов. Это подтверждается также успешной работой аналогичной ГеоТЭС в Лардерелло (Италия).

Согласно данным, приведенным в работе [13], только в западных штатах США мощность ГеоТЭС к 1990 г. достигнет 9000–17 000 МВт, а к 2015 г. — 28 000–65 000 МВт, что составит 2–4% всей вырабатываемой электроэнергии. При этом низкая себестоимость электроэнергии на ГеоТЭС позволит только в западных штатах получить 2–8 млрд. долл. прибыли, сэкономить 58,2 тыс. т ядерного топлива

Таблица 1.3

Стоимости установки и электроэнергии для электростанций различных типов в США по данным на 1970 г. [1]

	Стоимость электроэнергии			
	ГеоТЭС	Атомная станция	ГЭС	ТЭС на угле
Капитальные затраты на электростанцию, долл./кВт	110	225	250	150
Установленные расходы (14% годовых на 1 кВт)	15,4	31,5	35	21
Установленные расходы, 10^{-3} долл./кВт·ч	1,95	4	6,1	4,36
Эксплуатационные расходы, 10^{-3} долл./кВт·ч	0,25	0,5	0,1	0,25
Стоимость тепловой энергии, 10^{-3} долл./кВт·ч	2,66	2,0	—	3,0
Общая стоимость				
С учетом переменного коэффициента использования, 10^{-3} долл./кВт·ч	4,86	6,5	6,2	7,61
С учетом коэффициента использования, равного 90%, 10^{-3} долл./кВт·ч	4,86	6,5	4,55	5,92

и 112 млн. м³ нефти. Оценки, представленные в упомянутой работе, сделаны с учетом ежегодного увеличения стоимости ископаемого топлива на 5%.

Пока не получены данные, аналогичные приведенным в табл. 1.2, для систем с влажным паром. Но следует иметь в виду, что затраты как на саму ГеоТЭС, так и на производство энергии оказываются выше, чем для систем с сухим паром. Это связано с потребностью в большем количестве продуктивных скважин в пересчете на единицу производимой мощности. Кроме того, требуется больше оборудования, химические проблемы становятся более значительными, а большой объем горячей воды, получаемой вместе с паром, необходимо отделять, отводить и закачивать в месторождение или избавляться от нее каким-либо другим способом. Согласно сделанным оценкам, увеличение затрат, однако, невелико. Это подтверждается успешной работой ГеоТЭС на влажном паре в Новой Зеландии и в других странах мира.

Представляет интерес, в частности, положительный опыт работы такой ГеоТЭС в Серро-Прието на северо-западе Мексики, где перегретые геотермальные воды представляют собой достаточно концент-

рированный раствор и аналогичны имеющимся в некоторых частях долины Импириал-Валли (шт. Калифорния).

В табл. 1.4 приведены прогнозируемые данные для ряда ГеоТЭС мира, заимствованные из работы [16].

Пока не имеется аналогичных данных для систем, использующих низкотемпературные термальные воды для производства электроэнергии, а также для двухконтурных ГеоТЭС. Как указывалось, в долине Импириал-Валли работает экспериментальная установка с изобутановой турбиной мощностью 10 МВт [6]. Если этот опыт окажется успешным, то можно рассчитывать на создание других таких установок.

До сих пор отсутствуют также оценки стоимости для систем с сухими породами, так как такие установки пока не созданы. Тем не менее имеются достаточно надежные оценки затрат на бурение, образование трещиноватости и сооружение наземной части. При этом проблемы, связанные с соле- и газосодержанием теплоносителя, т.е. с солеотложением, закупоркой, коррозией и с загрязнением окружающей среды, существенно менее сложны, чем для большинства систем с перегретыми природными растворами. Соответственно, если такая система будет создана, то стоимость установки и эксплуатационные расходы не должны превышать соответствующих расходов для геотермальных систем на природном влажном паре и перегретой воде, которые, как предполагают, будут конкурентоспособными с тепловыми и атомными электростанциями.

Таблица 1.4

Прогнозируемые данные по удельной стоимости и по стоимости электроэнергии для ряда ГеоТЭС мира [16]

	Мощность, МВт	Удельная стоимость, долл./кВт·ч	Стоимость электроэнергии, 10^{-3} долл./кВт·ч	Примечание
ГеоТЭС на сухом паре				
Долина Больших Гейзеров				
Энергоблок № 11	106	132	5,71	
Энергоблок № 14	110	148	6,35	
Лардерелло	25		2,96	
ГеоТЭС на перегретой воде				
Серро-Прието	75	264	8	Данные 1973 г.
Отаке	30	288	6,5	Данные 1970 г.
Уайракей	192		5,14	Данные 1970 г.

Отметим, что интерес к геотермальным источникам энергии резко повысился с конца 1973 г. после обострения энергетического кризиса и роста цен на нефть. В новой правительственной энергетической программе США развитию новых источников энергии, в частности использованию геотермальной энергии, уделено большое внимание. Одним из пунктов этой программы является также экономия наиболее дефицитных видов топлива.

Воздействие на окружающую среду

Не существует таких энергетических систем, которые не оказывали бы влияния на окружающую среду. Однако геотермальные системы по сравнению с другими существующими или разрабатываемыми системами вызывают в этом плане наименьшее число возражений.

Что касается использования земли и влияния на окружающий ландшафт, то ГеоТЭС имеет те же недостатки, что и любая электростанция, но к преимуществам ГеоТЭС при этом следует отнести обычно малые их размеры и отсутствие площадей для хранения топлива, погрузочно-разгрузочных работ и оборудования для сжигания топлива а также дымовых труб. Требуется, однако, системы сбора пара или воды, но, как и системы коммунального водоснабжения или системы сбора на нефтяных или газовых месторождениях, они могут или соответствовать, или не соответствовать местным постановлениям о защите окружающей среды.

Шум и запахи от геотермальных систем не превышают допустимых пределов. Лишь при освоении месторождений природного пара могут потребоваться дополнительные меры при вполне приемлемых расходах. В этом плане гидротермальные системы и системы с сухими породами обладают определенным преимуществом.

Проблема, связанная с содержанием нежелательных минеральных солей в паровом конденсате или в воде из месторождений с влажным паром, не перешедшей в пар, традиционно решалась путем сброса таких вод в близлежащий водоем. Это обычно вызывало значительное химическое и тепловое загрязнение поверхностных вод, которое стало теперь недопустимым по нормам, принятым во многих странах. Решением проблемы является закачка использованной воды в продуктивную формацию через непродуктивные скважины или через специальные пробуренные для этой цели скважины. При этом восполняется часть извлеченной из месторождения жидкости и снижается опасность значительного оседания поверхности.

Опасность оседания возникает в случае извлечения из недр в больших количествах воды или пара. Над системами с сухими породами, которые не заполнены водой и расположены на большой глубине в ограниченном пространстве, вряд ли могут произойти заметные оседания поверхности. Однако гидротермальные системы, которые обычно занимают большие площади, включают более узкие формации и пористые породы и из которых извлекаются большие количества жидкости, весьма подвержены оседанию. К счастью, опыт, приобретенный при добыче нефти, показывает, что закачка жидкости в количествах, достаточных для поддержания постоянного давления в месторождении, может предотвратить значительное оседание. И хотя на геотермальных месторождениях это не всегда возможно, никогда не следует отказываться от подобных попыток.

Зоны малой сейсмической активности обычно концентрируются в районах потенциально продуктивных геотермальных месторождений и поэтому могут быть своего рода ориентирами их местоположения. Значительные же землетрясения, которые могут привести даже к отдельным разрушениям на поверхности, в районах расположения геотермальных месторождений происходят гораздо реже, чем в подобных им по геологической структуре зонах, по-видимому, в связи с тем, что высвобождение при микроземлетрясениях малых количеств энергии предотвращает накопление значительной энергии, вызывающей сильный толчок.

Единственно реальная опасность возникновения сильных землетрясений связана с закачкой жидкости в естественные геотермальные месторождения, а также с давлением нагнетания теплоносителя при создании и использовании искусственных систем. Изучения землетрясений в Денвере, проведенные Геологической службой и другими организациями США, а также эксперименты по созданию искусственных землетрясений в Рейнджли (шт. Колорадо) показывают, что значительные землетрясения возможны лишь при закачке больших количеств жидкости при сравнительно высоких давлениях в сейсмически активные системы. В общем случае такого неудачного сочетания условий можно избежать, и поэтому возникновение разрушительного землетрясения при разработке или использовании геотермальных систем маловероятно.

Удачные опыты и работы по закачке использованных вод проведены в Витербо (Италия), Ауачапане (Сальвадор), Отаке (Япония), а также в Долине Больших Гейзеров и Импириал-Валли (шт. Калифорния) и в Валлес-Кальдера (шт. Нью-Мексико). Причем в Долине Больших Гейзеров ежедневно закачивается в землю до 18 тыс. т конден-

сата, а в Валлес-Кальдера через две специальные скважины только в 1973–1974 г. было закачено почти 380 тыс. т воды.

Преимущества и недостатки

Геотермальные установки, работающие на влажном паре, обычно невелики по размеру, что имеет свои преимущества и недостатки. Поскольку пар нельзя экономично транспортировать на большие расстояния, то приходится размещать ГеоТЭС, работающую на природном паре, непосредственно вблизи месторождения, которое обычно удалено от основных потребителей тепла и электроэнергии. Горячую воду при умеренных давлениях можно достаточно эффективно перекачивать по трубам на расстояния до нескольких десятков километров, и тем не менее для систем с горячей водой также необходимо, хотя и в меньшей степени, соблюдать ограничения, касающиеся размещения установки недалеко от месторождения.

Извлечение энергии из сухих геотермальных месторождений целесообразно по целому ряду причин. Сухие горячие породы являются не только самым большим, но и наиболее распространенным источником энергии. Если будет разработан экономически выгодный метод извлечения энергии из сухих пород, то станет возможным создание системы для извлечения геотермальной энергии почти всюду, где требуется тепло или электричество. Дополнительным преимуществом такой системы является значительное снижение потребности в новых линиях электропередач, трубопроводах и других систем транспортировки.

Изучение возможностей и экономических показателей таких систем и соответствующих проблем только началось, но результаты уже первых исследований показывают, что сухие геотермальные системы в итоге внесут существенный вклад в долгосрочное обеспечение мировых потребностей в энергии и в решение вопросов защиты окружающей среды от загрязнений.

Новые методы разведки

Этот раздел написан по материалам обзора новых методов разведки геотермальных месторождений [17], дополненного некоторыми данными, опубликованными в трудах Второго симпозиума по освоению и использованию геотермальных ресурсов [6].

До недавних пор для выявления геотермальных месторождений применялось лишь бурение в районах с проявлением геотермальной активности в виде гейзеров, фумарол и термальных источников.

К сожалению, подобные поверхностные проявления не всегда соответствуют действительным условиям под поверхностью земли [18], и во многих таких районах разработки геотермальной энергии оказываются нецелесообразными. В то же время имеются районы, в которых поверхностные проявления отсутствуют, а подповерхностные условия благоприятны для освоения и использования геотермальных ресурсов. Поэтому необходимо использовать более сложные методы разведки, которые дополняют или дают новую информацию к получаемой лишь по поверхностным проявлениям.

Начальной стадией любой программы разведочных работ является геологическая рекогносцировка месторождения и составление соответствующей карты. Структурная геология особенно важна при определении геотермальных аномалий. Крупнопадающие смещения или смещения типа надвигов типичны для геотермальных месторождений и, по всей видимости, способствуют проникновению поверхностных вод на большие глубины [19]. Структурные впадины, такие как область озера Солтон-Си (шт. Калифорния) или район Рио-Гранде (шт. Нью-Мексико), являются подходящими крупномасштабными структурами для получения геотермальной энергии.

Фотографическое картирование, позволяющее быстро изучить большой район, используется для составления крупномасштабных геологических карт. Данные о структуре и литологии могут быть получены непосредственно с помощью аэрофотосъемки, позволяющей также выявить тепловое состояние поверхности [20–22].

Очень близка к фотографическому картированию инфракрасная аэросъемка (включая космическую) [21, 22]. Поскольку такая съемка чувствительна к теплоте, то она позволяет выявить районы с поверхностными и подповерхностными аномальными тепловыми потоками [23, 24].

В последнее время установлено, что ценным критерием для выявления геотермальных месторождений могут служить определенные изменения растительности [25]. Некоторые типы растительности с изменением температуры меняют свои свойства. Внезапное изменение растительности может служить ориентиром изменения режима грунтовых вод.

Следующим этапом программы разведки является геохимический анализ подземных вод, включающий отбор проб и изучение испарений, а также парового конденсата термальных вод. Такой геохимический анализ должен обеспечивать получение трех важнейших показателей: температуры воды, времени пребывания ее в системе и содержания в ней хлоридов. Максимальная температура воды является указателем

наиболее целесообразного места для извлечения геотермальной энергии. По поводу времени пребывания воды в системе в работе [19] сказано: "Если вода довольно долго находится в месторождении, то это свидетельствует о медленной его "перезарядке", т.е. о его исчерпании и нецелесообразности его освоения".

В работе [26] предложен метод выявления различия между системами с сухим и влажным паром. Системы с сухим паром характеризуются наличием термальных источников, содержащих сульфаты и незначительное количество хлоридов. Системы с влажным паром отличаются высоким содержанием хлоридов.

В настоящее время разрабатывается перспективный вид разведки, предусматривающий применение гидродинамики к системам с природным паром [19]. Этот метод позволяет количественно описать движение подземных вод в пределах месторождения. Знание гидродинамики помогает определить время функционирования данного геотермального месторождения с начала его освоения. Другие методы региональных исследований, связанные, например, с определением температуры и тепловых потоков, позволяют локализовать зоны с перегретой жидкостью.

Электрические методы разведки обеспечивают относительно быструю и полную рекогносцировку. Рост температуры подземных вод приводит к уменьшению электрического сопротивления формации. Изменения последнего часто связаны с изменениями солености грунтовых вод или геологической формации.

Новым методам разведки и полученным с их помощью результатам посвящено много работ, опубликованных в трудах Второго симпозиума ООН по освоению и использованию геотермальной энергии [6, т. 2]. В них сообщается о разведочных работах в шт. Невада, Монтана, Техас, Айдахо, Калифорния и на Гавайских островах. В юго-восточной части долины Импириал-Валли в 1974–1975 гг. проведена разведка геотермальной аномалии Дьюнс [27]. Здесь с шагом ~ 2 км были размещены 22 теллурические станции, с помощью которых проведено картирование и электропрофилирование.

Согласно полученным результатам, электрические методы весьма перспективны, поскольку геотермальные области являются центрами высокой электропроводности. В теллурическом методе используется естественное электромагнитное поле, образующееся при изменениях магнитного поля Земли, и возникающие при этом токи в земле. Как указано в работе [27], теллурический метод достаточно прост и дешев.

Геофизическое исследование месторождения в долине реки Рафт (шт. Айдахо), где в 1975 г. пробурена скважина глубиной 1526 м и получена температура на ее забое 147°C , проводились с помощью различных методов (магнитных, сейсмических и др.). В шт. Невада проведены измерения радиоактивности термальных вод и обнаружено, что их показатели отличаются от показателей для обычных холодных вод, причем последние оказываются выше.

В Новой Зеландии для разведки использовались сейсмические методы. При контакте подземных вод с источником тепла возникает сейсмический шум, который может быть использован для определения размеров наиболее предпочтительного геотермального водоносного слоя [19, 28, 29]. Для изучения подземных геологических структур в Новой Зеландии использовались также сейсмические методы преломленных и отраженных волн.

Гравиметрическая и магнитная съемки являются двумя дополнительными методами разведки геотермальных месторождений [30, 31]. Ослабление магнитного поля часто связано с гидротермальной активностью. Гравиметрическая съемка также может быть использована для изучения глубинных подземных структур и для выявления питающих каналов или характеристик месторождения.

Окончательным и наиболее важным этапом разведки является бурение, без которого невозможно определить запасы месторождения. Кроме того, с помощью бурения определяются пористость и проницаемость породы, а также характеристики проникающей жидкости.

При разведке геотермальных месторождений всегда следует иметь в виду, что для различных геологических структур требуются различные методы разведки. Так как расходы на бурение могут оказаться очень высокими, то прежде, чем его начинать, следует провести разнообразную, эффективную и самое главное недорогую программу разведочных работ.

Исследовательские работы и освоение геотермальных ресурсов в США

Программы по исследованиям и освоению геотермальных ресурсов в США выполняются рядом правительственных учреждений, а также учреждениями большинства западных штатов страны и частными фирмами. Приведенные ниже описания этих программ и оценка потенциальных запасов геотермальных месторождений США заимствованы из работы [5] и дополнены данными из работы [6].

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ СЛУЖБА США

До 1971 г. Геологическая служба США не имела финансируемой программы работ по геотермальным ресурсам, хотя отдельные исследования термальных источников и других геотермальных проявлений проводились как часть общей программы Геологического отдела по изучению энергетических и ископаемых ресурсов. Эти исследования были начаты Уайтом в 1945 г. в Стимбот-Спрингс, причем основное внимание в них уделялось способам транспортировки руды и проблемам отложений. Тем не менее полученные за десять лет результаты оказались весьма полезными для понимания природы геотермальных ресурсов.

Начиная с 1963 г. работы службы проводились в основном на геотермальном поле в районе озера Солтон-Си совместно с исследованиями частных фирм, причем основное внимание уделялось изучению геохимии и петрологии гидротермальной системы. В 1966 г. начаты исследования всего спектра вопросов, связанных с геологией Йеллоустонского национального парка, включая интенсивное изучение районов с термальными источниками. Проводились геологическое картирование, геофизическая разведка, отбор проб из термальных источников и их анализ, а также было пробурено 13 исследовательских скважин на глубины до 340 м.

Было также изучено несколько других систем с термальными источниками, включая районы Сульфур-Бэнк и Клар-Лейк (шт. Калифорния), а также район Лейк-Сити. Источником весьма ценной информации для геотермальной разведки является проводимый службой сбор данных по температурам и другим параметрам термальных источников [32]. Ряд других исследований оказался важным при решении геотермальных проблем, в том числе исследования тепловых потоков, определение растворимости кремнезема, создание геохимических индикаторов температуры по содержанию кремнезема и соотношению Na/K и Na-K-Ca и экспериментальное изучение изменений горных пород.

В августе 1971 г. конгресс США выделил Геологической службе 500 тыс. долл. специально для расширенной программы исследований геотермальных ресурсов. В результате

1) увеличен штат сотрудников, занимающихся классификацией федеральных земель, на которых расположены геотермальные месторождения, и проведена подготовка этих земель для сдачи в аренду;

2) начата реализация проектов в Долине Больших Гейзеров, в Клар-Лейк и Лонг-Валли (шт. Калифорния) с использованием методов для детальных геологических, геохимических и гидрогеологических исследований;

3) начаты разведочные геологические, геохимические и гидрогеологические работы в северо-западной части шт. Невада и юго-восточной части шт. Орегон;

4) начато осуществление программы по разработке и испытанию новых геофизических методов (электрических, электромагнитных, пассивных сейсмических, инфракрасных);

5) начаты лабораторные исследования по гидрогеологическому моделированию, по химии растворов и геохимическим индикаторам температур в месторождениях.

На 1973 г. конгресс дополнительно ассигновал Геологической службе 1,8 млн. долл. на расширенную программу исследований геотермальных ресурсов, включающую рассмотрение новых проектов, надзор за сданными в аренду месторождениями и классификацию районов с новыми месторождениями. В соответствии с этой программой проведены гидрогеологические исследования на Гавайских островах и в горах Хемес (шт. Нью-Мексико). Геофизические исследования этих, а также других районов расширяются. Привлекаются методы микросейсмического и теллурического исследований, измеряются тепловые потоки на небольших и средних глубинах. С помощью ЭВМ предполагается моделировать физические процессы, температурные поля и гидрогеологические условия в нескольких геотермальных месторождениях. Изучены глубинные параметры (температура и гидрогеология) на побережье Мексиканского залива.

Начата рекогносцировка на Аляске, и расширены работы в западных штатах. Проводится химический анализ воды и образцов пород с помощью изотопов. Интенсивно изучается влияние геотермальных разработок на окружающую среду, в частности на оседание поверхности и возникновение землетрясений, причем соответствующие работы проведены прежде всего в долине Импириал-Валли (шт. Калифорния).

В 1974 г. Геологическая служба приступила к осуществлению пятилетней расширенной программы, включающей: 1) классификацию земель и надзор за их сдачей в аренду; 2) определение влияния на окружающую среду и оценку размеров загрязнения; 3) оценку возможностей геотермальных регионов перед их сдачей в аренду и разработку более совершенных методов разведки, включая бурение, для более детального изучения месторождений; 4) проведение региональной рекогносцировки и 5) изучение проблемы сброса растворов.

УПРАВЛЕНИЕ МЕЛИОРАЦИИ США

В связи с необходимостью проведения рекогносцировки с целью разработки генерального плана по обеспечению водой западных штатов США и определению экономически выгодного способа увеличения стока реки Колорадо на $3,1 \cdot 10^9$ м³ в год, эта работа была поручена Управлению мелиорации США. Наиболее подходящим объектом для решения обеих указанных задач оказались геотермальные ресурсы в Импириал-Валли (шт. Калифорния), которые могут быть использованы путем опреснения геотермальных растворов на обследованных участках. Управление мелиорации, а также Университет шт. Калифорния в Риверсайде в 1968 г. начали совместные работы по оценке потенциальных геотермальных ресурсов в этом районе.

В 1972 г. Управление мелиорации и Ведомство опреснения вод начали осуществлять совместную семилетнюю программу работ по исследованию и освоению геотермальных ресурсов, на которую было выделено 16 млн. долл. (из них 9,7 млн. долл. Управлению мелиорации). Задача программы состояла в определении возможности многоцелевого освоения геотермальных ресурсов Импириал-Валли для получения электроэнергии и опресненной воды. В 1972 г. на реализацию этой программы было израсходовано 800 тыс. долл.

В 1973 г. Управление мелиорации дополнительно запросило на реализацию этой программы 400 тыс. долл., чтобы ускорить ее выполнение, предусматривающее определение качества и количества растворов на обследованных землях, развитие методов многоцелевого освоения геотермальных ресурсов, демонстрацию возможности получения больших количеств пресной воды и, наконец, составление оптимального плана подачи обессоленных вод в реку Колорадо. Эта программа выполняется, причем она скоординирована с другими исследованиями, с тем чтобы наряду с оценками возможности производства электроэнергии определить целесообразность извлечения химических элементов и газов.

Управление запросило еще 5,7 млн. долл. на разведку в районах с нехваткой воды и в других геотермальных районах, способных обеспечить дешевой водой западные штаты. Такая разведка необходима для точной оценки всех потенциальных возможностей снабжения водой. На ранних этапах эта программа была сконцентрирована в большей степени на разведке и оценке ресурсов для получения пресной воды, чем на исследованиях и разработках, подобных проводимым в настоящее время в долине Импириал-Валли. Эти оценки должны быть полностью закончены в 1977 г. Программа управления в отношении геотермальных ресурсов состоит из следующих пунктов.

Разведочные работы. Согласно программе разведки, в максимально короткий срок необходимо оценить количество и качество геотермальных ресурсов на обследованных участках в долине Импириал-Валли. Будут выполнены геологическое и геофизическое исследования, а также пробурены неглубокие (до 460 м) скважины для определения температурных градиентов и несколько продуктивных скважин на глубины 1,5–2,1 км. Анализ качества имеющихся здесь вод необходим для определения возможности производства электроэнергии и получения пресной воды во всем исследуемом районе.

Надежные оценки размеров геотермальных ресурсов на федеральных землях в долине Импириал-Валли (почти все эти земли обследуются Управлением мелиорации) необходимы прежде всего для решения вопроса о замещении воды, чтобы исключить связанное с ее извлечением оседание поверхности. Если окажется, что соответствующий источник должен быть большим, то тогда наиболее экономически выгодным источником будет океан. Если же окажется достаточно умеренный или малый источник, то можно использовать закачку приповерхностных грунтовых вод, а также вод из таких природных резервуаров, как озеро Солтон-Си и система Уэлтон-Мозк-Дрэйн.

При достаточно больших размерах геотермальных ресурсов в долине Импириал-Валли, когда воду для замещения придется брать из океана, расходы по освоению такого месторождения должны быть распределены между Федеральным правительством и другими организациями, заинтересованными в получении электроэнергии и пресной воды по самой низкой цене.

Продуктивные скважины и скважины для закачки. Для проверки результатов программы разведки необходимо пробурить достаточное число продуктивных скважин на стадии исследования и освоения. Продуктивные скважины должны работать в течение продолжительного времени вместе со скважинами для закачки, чтобы определить оптимальное размещение и диаметр скважин. Во время работы скважин будут контролироваться такие воздействия на окружающую среду, как сейсмическая активность, оседание поверхности и загрязнение воздуха.

Исследование и освоение. Необходимо проведение исследований и разработок в различных регионах с целью решения проблемы получения пресной воды. Потребуется анализ оптимальных размеров и размещения продуктивных скважин и скважин для закачки. Будут изучены методы закачки, включая сброс остаточных продуктов. Будет рассмотрено совместное производство электроэнергии и пресной воды из растворов с целью оптимизации выигрыша от такого производ-

ства и определения возможности извлечения минерального сырья из остаточных продуктов.

Будет исследовано влияние оседания, сейсмической активности и других воздействий на окружающую среду при разработке геотермальных ресурсов и предложены методы устранения или ограничения нежелательных явлений. Ответ на эти важные вопросы должен полностью или частично подтвердить целесообразность освоения геотермальных ресурсов в пределах всей страны.

Оценки. Результаты описанной программы исследований и освоения геотермальных ресурсов должны быть тщательно проанализированы и оценены с точки зрения решения проблем окружающей среды, определения характеристик и размеров источника и экономической выгоды опреснения, с тем чтобы убедиться в необходимости освоения этих потенциальных запасов в интересах страны.

ВЕДОМСТВО ОПРЕСНЕНИЯ ВОД

В 1972 г. Ведомство опреснения вод приступило к реализации семилетней программы по разработке методов получения пресной воды из геотермальных растворов, на которую было ассигновано 6,3 млн. долл. Целью программы является разработка экономических и технически осуществимых процессов производства высококачественной воды. Процессы опреснения должны быть совместимы с другими процессами, основанными на использовании геотермальной энергии, такими, как производство энергии и получение минерального сырья, что в целом должно обеспечить оптимальное и всестороннее освоение геотермальных ресурсов.

Исследования геотермальных растворов ведутся в основном в долине Импириал-Валли (шт. Калифорния) в тесном сотрудничестве с Управлением мелиорации. Большинство разрабатываемых методов применимо для опреснения геотермальных растворов и в других местах.

В 1973 г. на выполнение программы было выделено 800 тыс. долл., что позволило провести исследования химии растворов и конструкционных материалов, изучить процесс опреснения и его влияние на окружающую среду, а также рассмотреть методы сброса остаточных продуктов. Работы по изучению химии растворов включали определение состава раствора и химических реакций, происходящих в пределах опреснительной установки и в системе сброса выяснение размеров солеотложения в оборудовании и разработку способов его минимизации, а также изучение всех процессов и химических реакций в глубоких скважинах системы сброса.

Особое внимание было уделено отысканию экономических и надежных конструкционных материалов, способных работать с коррозионно-активной геотермальной жидкостью — горячим кислотным раствором, содержащим сероводород и углекислый газ. Были определены параметры процесса, включая коэффициенты теплообмена и характеристики вскипания, а также выбраны наиболее эффективные конструкции отдельных элементов установки. Будут разработаны методы, позволяющие включить опреснительную установку в геотермальную систему совместного производства энергии, воды и минерального сырья. Согласно семилетней программе, в 1974 г. должна быть разработана и создана опреснительная установка производительностью 750–1900 т пресной воды в сутки, а в 1976 г. — аналогичная установка производительностью 7500–11250 т в сутки.

ГОРНОРУДНОЕ УПРАВЛЕНИЕ

Горнорудное управление в течение многих лет осуществляло программы, косвенно связанные с освоением геотермальных ресурсов и предусматривавшие извлечение полезных ископаемых и ископаемого топлива, их обработку, использование, повторное использование и удаление отходов, но специальной программы исследований геотермальных ресурсов оно не имело. Лишь в 1973 г. Горнорудное управление впервые израсходовало 160 тыс. долл. на создание усовершенствованных буровых растворов и цементов для использования при бурении и при обсадке геотермальных скважин при температурах до 350°C. В 1974 г. Горнорудное управление приступило к осуществлению расширенной пятилетней программы, направленной в основном на извлечение растворенных в геотермальных растворах минеральных солей и газов.

Рассолы после опреснительной установки могут служить сырьем для извлечения минеральных веществ, а неконденсирующиеся газы могут отделяться на специальной установке. Исследования по этой программе проводятся на геотермальных рассолах в долине Импириал-Валли, а также в других областях с перспективными геотермальными ресурсами. При обнаружении в рассолах экономически выгодного содержания минеральных солей и газов целесообразно соорудить установку для их извлечения в непосредственной близости от опреснительной установки, из которой будет поступать на обработку исходное сырье.

Программа геотермальных исследований Горнорудного управления состоит из шести пунктов: 1) создание системы для химического

анализа рассолов, включая определение количества ценных компонентов; 2) разработка методов извлечения этих ценных компонентов; 3) разработка методов отделения не представляющих ценности компонентов и их удаления; 4) определение критерия выбора конструктивных материалов для установки по переработке горячих рассолов; 5) выявление новых металлургических процессов, в которых могут использоваться остаточные рассолы, и 6) улучшение буровых растворов и цементов, позволяющее снизить стоимость использования геотермальных ресурсов.

БЮРО ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ

Распоряжаясь государственными землями, Бюро землепользования ответственно за сдачу в аренду принадлежащих федеральному правительству геотермальных ресурсов в соответствии с законом 1970 г. об использовании природного пара, законом 1969 г. о защите окружающей среды, другими законодательствами, а также соответствующими предписаниями и правилами. Конгресс в 1973 г. ассигновал бюро ~200 тыс. долл. на программу по сдаче в аренду земель с геотермальными месторождениями. С 1974 г. бюро осуществляет расширенную пятилетнюю программу, которая содержит следующие пункты.

1. Выявление потенциальных геотермальных территорий для арендования в соответствии с данными и оценками Геологической службы, Горнорудного управления и Бюро землепользования.
2. Разработка условий арендования.
3. Рассмотрение вопросов защиты окружающей среды и планирование использования земель на каждой сдаваемой в аренду территории.
4. Оценка ресурсов, стоимости и конъюнктуры с учетом проведенных Геологической службой уточнений оценок дополнительных скидок при аренде территории.
5. Наблюдение за территориями после сдачи в аренду.
6. Подготовка специалистов.
7. Использование ЭВМ, в памяти которых должны храниться все данные о наличии геотермальных ресурсов и используемых землях в тех районах, которые признаны пригодными для сдачи в аренду.
8. Проведение программы, предусматривающей совершенствование правил и порядка арендования; правил, регули-

лирующих отношения до сдачи территории в аренду, а также после сдачи; рассмотрение вопросов защиты окружающей среды.

НАЦИОНАЛЬНЫЙ НАУЧНЫЙ ФОНД

Национальный научный фонд начал изучать вопрос о необходимости использования геотермальной энергии в конце 1971 г. и уже в 1972 г. были представлены четыре проекта работ. Первый из них "Исследование теплового режима рифтовой системы Рио-Гранде в шт. Нью-Мексико" общей стоимостью 24,9 тыс. долл., рассчитанный на два года, был составлен Рейтером из Горного института (шт. Нью-Мексико). Предлагалось провести геофизическое исследование указанного района, чтобы оценить его потенциальные возможности как крупного источника геотермальной энергии. Рифт Рио-Гранде имеет много геологических и геофизических показателей, свойственных как срединно-океаническим хребтам, так и уже освоенным продуктивным геотермальным системам. Предполагалось получить данные по тепловому потоку вдоль рифта и несколько профилей поперек него.

Проект Хиккеля из Университета шт. Аляска, представленный на конференции, посвященной изучению геотермальных ресурсов, общей стоимостью 56,5 тыс. долл. был рассчитан на реализацию в течение 8 месяцев. Целью конференции были оценка общего состояния вопроса и составление программы по изучению роли геотермальных ресурсов в 1) обеспечении дополнительной энергией для покрытия возрастающей ее нехватки в США; 2) удовлетворении существующих потребностей в воде и 3) обеспечении минеральным сырьем.

Программа Кругера и Рэйми из Стэнфордского университета, посвященная стимулированию геотермальных водоносных горизонтов, стоимостью 141,5 тыс. долл. была рассчитана на 1 год. Программа имела три основные задачи: 1) создание экспериментальных и численных методов определения оптимальных характеристик геотермальных водоносных горизонтов, стимулированных с помощью взрыва; 2) создание модели геотермального парового месторождения для оценки теплофизических, гидродинамических и химических параметров в нем; 3) создание лабораторной модели полости, получаемой с помощью взрыва, для изучения происходящих в ней процессов кипения, передвижения фронтов вскипания и двухфазного течения в горячей пористой среде, а также для получения данных по химическим и радиохимическим параметрам образующихся флюидов.

Программа по изучению гидротермальных систем вблизи вулкана Килауэа на Гавайских островах, стоимостью 462,5 тыс. долл., составленная Келлером из Горной школы (шт. Колорадо), была рассчитана на реализацию в течение года. Окрестности вулкана Килауэа стали геотермальной исследовательской лабораторией для изучения движения подземных вод вблизи магматического очага. В ходе такого исследования можно было проверить ряд физических гипотез относительно характеристик гидротермальных систем. Цель работы состояла в получении данных о динамике подземных вод в гидротермальной системе и создании модели, которая могла бы использоваться для разработки эффективных методов разведки других геотермальных систем.

Основной частью программы Келлера было бурение опытной скважины на склоне вулкана, чтобы с максимальной вероятностью вскрыть гидротермальную конвективную ячейку над магматическим очагом вулкана Килауэа. Программой предусматривались также дополнительные геофизические исследования в верхней части вулкана, а также проведение физических опытов в пробуренной скважине и изучение извлекаемых образцов.

В 1973 г. Национальный научный фонд (при поддержке Конгресса США) определил расходы в 1,5 млн. долл. на выполнение раздела по преобразованию энергии Программы работ по научным исследованиям и разработкам в области энергетики и 0,5 млн. долл. на раздел по энергетическим источникам. Раздел по преобразованию энергии в основном посвящен научным исследованиям и практическим методам использования геотермальных ресурсов, а раздел по энергетическим источникам — методам их оценки, разведки и т.д.

КОМИССИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

До 70-х годов Комиссия по атомной энергии не имела специальной программы исследований геотермальных ресурсов, однако ряд проведенных в последние годы исследований под ее руководством имеет непосредственное отношение к изучению и освоению источников геотермальной энергии. В 1970–1971 гг. совместно с фирмами "Баттель–Нордвест", "Америкэн ойл шейл", "Вестингауз" и лабораторией "Лоуренс–Ливермор" Комиссия по атомной энергии провела детальное изучение технических и экономических возможностей извлечения тепловой энергии из относительно сухих геотермальных месторождений с помощью ядерных взрывов, используемых для дроб-

ления горных пород, и последующей закачки воды, выполняющей роль теплоносителя.

Программа Лос-Аламосской научной лаборатории предусматривает разработку термического бурения с использованием электрической энергии. Прототип такого бурения успешно был опробован в лаборатории и на месторождении. В этой же лаборатории были проведены предварительные исследования возможности использования гидравлических и термических методов создания трещиноватости для получения больших поверхностей теплообмена в горячих, но относительно сухих породах с целью извлечения из них тепла для производства электрической энергии. Кроме того, фирмой "Баттель–Нордвест" проведены лабораторные исследования кремнезема и радиоактивных изотопов, полученных из расплавленных при подземных ядерных взрывах пород.

В 1973 г. Комиссия по атомной энергии оценила начальные расходы на программу исследований и разработок, предусматривающую широкое использование геотермальной энергии и ее экономически выгодное преобразование в электрическую энергию, в ~ 2 млн. долл.; основное внимание в программе уделено исследованию возможности получения энергии из относительно сухих геотермальных месторождений путем закачки в них и последующего извлечения воды под большим давлением.

Упомянутая программа предусматривает также изучение поведения сухих геотермальных месторождений в процессе их охлаждения при извлечении тепла с целью определения влияния системы гидравлического разрыва и расширения этой системы за счет образования трещин под действием термических напряжений, сопровождаемого увеличением поверхности теплообмена. Проведены лабораторные исследования и предварительная подготовка месторождений для определения возможностей, методов и экономической выгоды освоения сухих геотермальных месторождений при циркуляции охлаждающей воды через горячие породы, подвергнутые гидравлическому разрыву. Для этой цели находят месторождения с достаточно высокой температурой пород (300°C и выше), в которых из-за низкой проницаемости содержится мало подвижных подземных вод или они совсем отсутствуют.

Будут также проведены оценки методов интенсификации извлечения геотермальных теплоносителей в известных геотермальных районах, в которых пар или горячая вода по температуре, расходу или концентрации не пригодны для экономически выгодного производ-

ства электрической энергии. Полагают, что методы интенсификации, аналогичные успешно применяемым при добыче нефти и газа, могут оказаться полезными и в данном случае.

Будут исследованы массоперенос кремнезема, а также химические, гидравлические и тепловые характеристики природных геотермальных систем с целью создания методов удаления примесей и разработки оборудования электростанций в соответствии с характером геотермального теплоносителя. Эти исследования должны обеспечить информацию, необходимую для разработки методов оценки экономических показателей геотермальных систем и способов производства электрической энергии, а также оценки стоимости и эффективности программ изучения и освоения геотермальных ресурсов.

Программа работ Национального научного фонда, включающая инженерный анализ современного уровня техники, предусматривает также разработку эффективных двухкомпонентных систем преобразования энергии для геотермальных теплоносителей с более низкой температурой или высокой коррозионной активностью с целью увеличения к.п.д. преобразования тепловой энергии в электрическую и расширения интервала используемых параметров геотермальных теплоносителей.

МИНИСТЕРСТВО ОБОРОНЫ США

Управление научно-технических исследований Министерства обороны США исследовало возможности применения источников геотермальной энергии для специальных военных целей. По-видимому, источники геотермальной энергии смогут удовлетворять потребности армии в энергии в значительно меньшей степени, чем при промышленном производстве энергии. Интерес министерства вызывают следующие возможные применения геотермальной энергии: 1) основной источник надежного энергоснабжения в отдаленных местностях; 2) аварийный источник энергии в тех случаях, когда обычные источники энергии разрушены, и 3) автономный резервный источник энергии для работы подземного и подводного оборудования, способный обеспечивать обогрев и кондиционирование помещений, снабжение питьевой водой и электрической энергией.

Выполняемые управлением работы ограничены требованиями Министерства обороны, необходимостью проведения исследований и разработок только для различных военных целей и предварительным исследованием определенного геотермального месторождения применительно к существующему военному оборудованию с целью выяснения объема исследований, необходимых для разработки источника энергии этого типа для выбранных военных целей.

НАЦИОНАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПО АЭРОНАВТИКЕ И ИССЛЕДОВАНИЮ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА (НАСА)

В течение ряда лет НАСА проводило совместные исследования с Геологической службой в отдаленных частях геотермальных областей. Согласно совместной программе, данные Геологической службы, полученные в полевых и лабораторных условиях, а также результаты аэрофотосъемки дополняются данными НАСА, полученными с помощью метода инфракрасного сканирования и фотографиями, выполненными со спутников и космических кораблей. Эта программа продолжается в космосе по отдельным предложениям Геологической службы, выбранным НАСА для анализа результатов полетов 1972 г. (специальный спутник ERTS-A для изучения земных ресурсов) и 1973 г. ("Скайлеб"). Спутник ERTS-A, приземлившийся в июле 1972 г., летал по орбите в течение года. Его вес 818 кг, диаметр 1,52 м. Вместе с панелями (солнечными батареями) он имел длину 3,04 м и ширину 3,46 м. Средняя высота полета составляла 914 км. С него удавалось наблюдать полосу Земли шириной 180 км. Полученные с его помощью телевизионные и спектральные изображения косвенно применяются для изучения геотермальных областей, причем для анализа используются наблюдения за таянием снегов и аномалиями растительности. Такие данные с ERTS-A получены и анализируются не только в США, но и в Италии [33]. Изображения, полученные с помощью инфракрасного метода с космического корабля "Скайлеб" (1973 г.), позволили непосредственно наблюдать за температурными аномалиями, при этом разрешающая способность при съемке Земли составляла $80''$, а чувствительность измерения температуры 0,4 К. НАСА намерено продолжить свои работы по исследованию геотермальных ресурсов, чтобы дополнить традиционные методы исследования.

Для выполнения своих обязательств НАСА в последние годы провело специальные работы по усовершенствованию различной техники и приборов. Частными вопросами в области геотермальных ресурсов, в решение которых НАСА может внести вклад в рамках сотрудничества с другими организациями, являются: создание материалов, изучение циклов преобразования энергии и течений в трубах, а также разработка шумоглушителей и компрессоров. В 1974 г. Управлением по исследованию океанов и атмосферы США был запущен спутник NOAA-3, с помощью которого, в частности, изучались геотермальные области в Йеллоустоунском национальном парке (шт. Вайоминг).

РОЛЬ УЧРЕЖДЕНИЙ АМЕРИКАНСКИХ ШТАТОВ

Учреждения многих западных штатов США, занимающиеся изысканием природных ресурсов, проводят изучение геотермальных ресурсов. Отделение горнорудной промышленности и геологии, а также Отделение водных ресурсов и Отделение нефти и газа (шт. Калифорния) в течение многих лет осуществляли ряд программ, включающих оценку геотермальных ресурсов штата, а также проведение геологических исследований продуктивного месторождения в Долине Больших Гейзеров и некоторых других перспективных областей в штате. Отделение геологии и горнодобывающей промышленности шт. Орегон и Управление горнорудной промышленности и минеральных ресурсов шт. Нью-Мексико также в течение ряда лет осуществляли свои программы геотермальных исследований в результате чего был составлен каталог по термальным источникам в обоих штатах и проведен геологический анализ наиболее перспективных районов.

Программы по изучению геотермальных ресурсов имеют также Управление горнорудной промышленности и геологии штатов Невада, Айдахо и учреждения, занимающиеся изысканием природных ресурсов штатов Аляска, Аризона, Колорадо, Монтана, Юта и Вашингтон. Всего во всех этих исследованиях и разработках, целью большинства которых является оценка геотермальных ресурсов, участвует несколько десятков научных работников и инженеров, а ежегодные затраты на их проведение составляют $\sim 0,5$ млн. долл.

РОЛЬ ЧАСТНЫХ ФИРМ

Частные фирмы США приступили к осуществлению значительных программ по изысканию и освоению геотермальных ресурсов лишь в последние 20 лет. Фирма "Пасифик гэз энд электрик" в 1960 г. ввела в строй первую ГеоТЭС на природном паре, производимом фирмами "Магма пауэр" и "Термал пауэр".

В последние годы эти фирмы, а также фирма "Юнион ойл" с успехом освоили месторождение в Долине Больших Гейзеров, а также провели разведку других перспективных областей в западных штатах США. Несколько других фирм, в основном нефтяных, также присоединились в 60-е годы к этим работам, однако активность фирм не была значительной вплоть до 1970 г., когда был принят закон об использовании геотермальной энергии, разрешающей сдачу правительственных земель с геотермальными месторождениями в аренду.

Частные фирмы поддерживали работы по изучению и освоению геотермальных ресурсов во многих районах путем предоставления своих

специалистов, приглашения консультантов из университетов и других фирм. Из-за отсутствия данных о месторождениях, каждая программа разведки является в то же время программой исследовательских работ. Освоение месторождения в Долине Больших Гейзеров расширило знания о таких месторождениях и привело к разработке методов их освоения и использования.

Интересно отметить, что стоимость 1 т пара для бытовых потребителей Манхэттена (Нью-Йорк) в 15–20 раз выше, чем для потребителей пара из геотермальных источников, эксплуатируемых фирмой "Пасифик гэз энд электрик".

Освоение геотермального месторождения в окрестности озера Солтон-Си потребовало исследования и разработки новых методов производства электрической энергии и извлечения минерального сырья при использовании концентрированных термальных растворов. Фирмы поддерживали инженерные разработки электростанций, работающих по двухкомпонентной схеме, а также планы создания первой такой установки.

Целый ряд полученных фирмами результатов был опубликован в печати и представлен на научных конференциях. Тем не менее многие результаты не опубликованы и держатся в секрете от конкурентов. Общие затраты фирм на изучение и освоение геотермальных ресурсов неизвестны, однако, по всей вероятности, они достигают нескольких десятков миллионов долларов в год, не считая затрат на аренду земель, бурение и сооружение электростанций.

В заключение этого раздела отметим, что Управление энергетических исследований и разработок США (ERDA) выделило на освоение геотермальных ресурсов в 1974 г. 6,2, в 1975 г. — 13,9, а в 1976 г. — 28,4 млн. долл. [34]. По программе, разработанной ERDA, ссуды, выдаваемые заимодавцами фирмам под проекты, предусматривающие разработку источников геотермальной энергии, будут страховаться государством, что уменьшит финансовый риск заимодавцев.

Оценки предельных запасов геотермальной энергии

Оценки геотермальных ресурсов США и вклада от их использования в общие потребности страны в энергии отличаются более чем в тысячу раз. Например, расчеты, выполненные на основании сделанных Уайтом [35] оценок, показывают, что по крайней мере в течение ближайших 50 лет при существующих экономических условиях и современном уровне техники можно вырабатывать 5–10 тыс. МВт электрической мощности.

Согласно оценкам, приведенным в работе [36], к 1985 г. мощность ГеоТЭС США, главным образом в шт. Калифорния и Невада, может возрасти до 7–19 тыс. МВт.

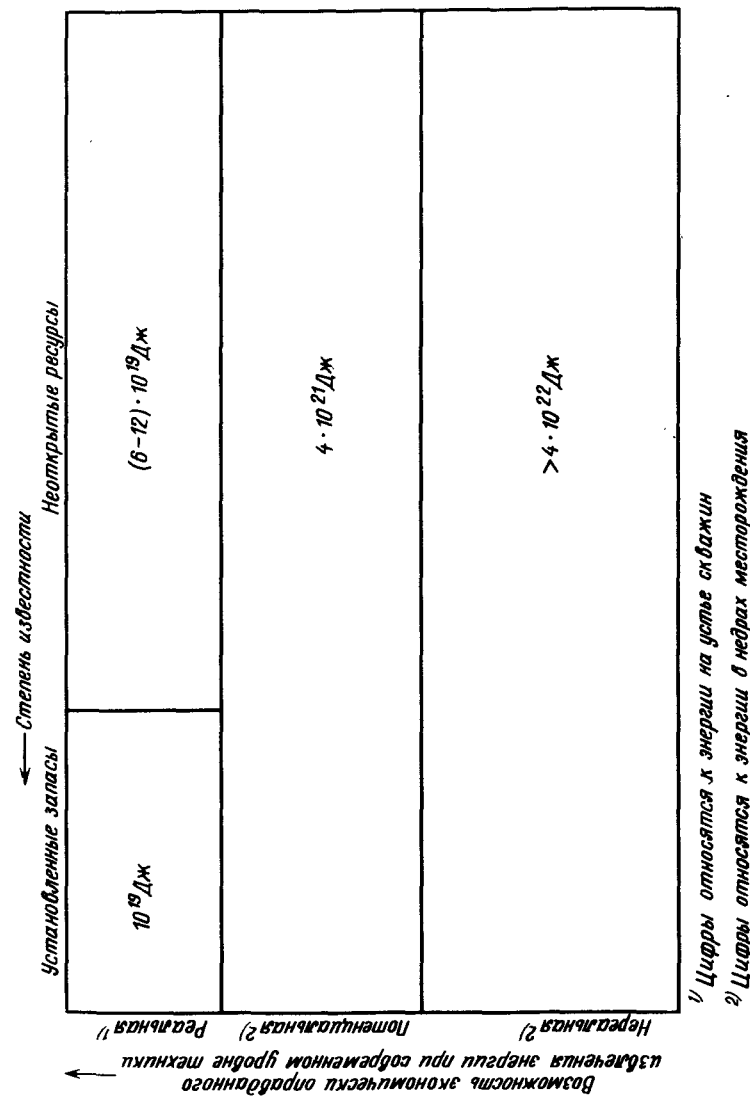
В докладе сенатской комиссии по топливным и энергетическим ресурсам в июне 1972 г. Рекс [37] указал, что при успешном выполнении расширенной правительственной программы мощность ГеоТЭС в западных штатах может возрасти в ближайшие 20 лет до 400 тыс. МВт.

Значительные отличия в оценках геотермальных ресурсов отражают влияние множества факторов, в том числе различных допущений относительно развития техники и уровня цен, а также целевого назначения оценок и неоднозначного истолкования понятий "ресурсы" и "запасы", однако основная причина расхождения заключается в отсутствии фактических данных о самих ресурсах.

Умеренные оценки геотермальных ресурсов и запасов приведены на фиг. 1.4 и составлены на основании приведенных в работе [38] данных. Запасы и ресурсы следует отличать от полных запасов, которые определяются Шурром и Нетшертом [39], как все количество данного материала, содержащегося в земной коре, независимо от того, известно или неизвестно о его существовании, и независимо от стоимостных показателей.

Полные запасы геотермальных ресурсов определяются в работе [39], как вся теплота земной коры при температурах выше средней температуры поверхности ($\sim 15^\circ\text{C}$). Согласно оценкам Уайта, количество этого тепла до глубины 10 км составляет $\sim 10^{27}$ Дж, что в 2000 раз превышает мировые запасы угля. Оценки Гросслинга количества тепла, заключенного в земной коре на территории США в породах до глубины 10 км и в подземной воде, содержащейся в трещинах и порах осадочных пород депрессий, дают $\sim 2 \times 10^{25}$ Дж [40]. Однако лишь очень малая часть полных запасов геотермального тепла может рассматриваться как ресурсы.

Извлечение всего содержащегося в земной коре тепла не только экономически неоправданно, но может привести к таким нежелательным последствиям, как оседание земной поверхности и землетрясения, связанным с возникновением термических напряжений. Какую часть полных запасов геотермальной энергии можно рассматривать в виде ресурсов, зависит от ряда факторов, таких, как глубина извлечения, предполагаемое распределение температур до этой глубины, эффективная пористость, удельная производительность месторождения и проницаемость его пород, физическое состояние теплоносителя (вода или пар), уровень техники, экономичность различных видов



Фиг. 1.4. Оценки запасов и ресурсов геотермальной энергии [5].

использования и политика правительства в области исследований, освоения, аренды, защиты окружающей среды и т.д. Допущения, касающиеся оценки технических возможностей, экономики и государственной политики, являются основной причиной больших отличий в опубликованных оценках геотермальных ресурсов.

Установленные промышленные геотермальные ресурсы в США (за исключением расположенных в Национальных парках) оцениваются на фиг. 1.4 в 10^{19} Дж на основе приведенной в работе [8] оценки содержания их в земле $6 \cdot 10^{19}$ Дж, включая измеренные и оцененные ресурсы. Эта оценка учитывает месторождения с преобладанием пара в Долине Больших Гейзеров, а также несколько месторождений высокотемпературных горячих вод, расположенных в западных районах США.

Так как при современном уровне техники можно извлечь только 15% тепла, то на фиг. 1.4 полные промышленные запасы оцениваются в 10^{19} Дж. Этого тепла достаточно для выработки 1000 МВт электрической энергии в течение ближайших 50 лет при к.п.д. преобразования энергии 14%. В отличие от этого, согласно оценкам Рекса [37], только запасы месторождений с преобладанием пара в Долине Больших Гейзеров могут обеспечить выработку 1000 МВт в течение 100 лет.

Неразведанные промышленные геотермальные ресурсы (стоимость извлечения энергии из которых соизмерима со стоимостью обычных видов энергии) оценены на фиг. 1.4 в $(6-12) \cdot 10^{19}$ Дж на устье скважины. Это количество тепла получено на основе оценки Уайта [35] промышленных геотермальных ресурсов США на глубине до 3 км, которые используются в виде электрической энергии (в предположении, что 1% всего этого тепла при температуре месторождения превращается в электрическую энергию). Такого количества геотермальных ресурсов достаточно для производства 3000–6000 МВт электрической энергии в течение 50 лет.

При оценках вырабатываемой электрической энергии должны приниматься во внимание возможности современной технологии. Поэтому, учитываемые в этих оценках месторождения должны иметь температуры не менее 180°C , так как при меньших температурах после вскипания образуются малые количества пара, и представлять собой системы с преобладанием пара и с высокотемпературными водами.

По сравнению с приведенными оценками Рекс [37] показывает, что только на месторождениях с преобладанием пара в Долине Больших Гейзеров можно выработать 15 тыс. МВт мощности в течение 100 лет. Килкни [36] не дает точных оценок геотермальных ресурсов,

однако его прогнозы ожидаемой мощности ГеоТЭС основаны по крайней мере на минимальных оценках геотермальных ресурсов. Он, например, оценил установленную мощность ГеоТЭС в 1985 г. в 7000 МВт при стоимости $5,25 \cdot 10^{-3}$ долл./кВт·ч (производство электроэнергии от систем с преобладанием пара).

Оценка ресурсов для потенциально возможного промышленного использования составляет $4 \cdot 10^{21}$ Дж (фиг. 1.4). Такого количества тепла достаточно для производства 40 тыс. МВт мощности в течение по крайней мере 50 лет. Эти ресурсы, заключенные в основном в системах с высокотемпературными водами ($> 180^{\circ}\text{C}$), с экономической точки зрения целесообразно использовать уже в настоящее время или в ближайшем будущем. Решающими экономическими факторами могут оказаться стоимость закачки использованного теплоносителя, разработка систем с вторичным теплоносителем или других эффективных систем и методов многоцелевого использования (электрическая энергия – пресная вода – минеральное сырье).

В настоящее время большое внимание уделяется производству электрической энергии из термальных вод путем использования системы, в которой тепло этих вод передается в теплообменнике другой жидкости, например изобутану или фреону, которые кипят при низких температурах и на паре которых работает турбина. Такая электростанция работает в Советском Союзе в Паратунке на Камчатке, где температура термальных вод составляет 81°C . В США к такой системе производства электроэнергии проявляют большой интерес, и, как известно, такая установка на изобутане мощностью 10 МВт уже сооружена летом 1976 г. и работает в Импириал-Валли [2]. Используемые здесь рассолы содержат $\sim 25,0\%$ растворенных солей. В схеме преобразования энергии предусмотрено четырехразовое вскипание рассола при постепенном уменьшении давления. Образовавшийся пар конденсируется в теплообменнике, при этом тепло передается второй жидкости (изобутану), которая испаряется и направляется в турбину. Паровой конденсат из теплообменника вместе с солями, выделившимися при вскипании рассола, возвращаются в коллектор. Если двухлетний опыт работы установки будет успешным, то на этом месторождении будет построена ГеоТЭС мощностью 50 МВт. Аналогичная установка работает в КНР [9].

Создание многоцелевой системы по производству электроэнергии, опресненной воды и извлечению минеральных солей создает экономические предпосылки для производства электрической энергии благодаря окупаемости значительной части затрат за счет производства побочных продуктов. В настоящее время разрабатывается не-

сколько проектов многоцелевых установок, в частности Управление мелиорации США и Ведомство опреснения вод планируют создание такой установки в Импириал-Валли. По оценкам Килкни [36], успешная работа этих установок обеспечит при несколько более высокой стоимости энергии $(5,75-6,25) \cdot 10^{-3}$ долл./кВт·ч, дополнительное производство 6000 МВт к 1980 г. и 12 тыс. МВт к 1985 г.

Рекс [37] при оценке известных запасов учел месторождения высокотемпературных вод в Импириал-Валли, а также более глубокие месторождения с преобладанием пара в Долине Больших Гейзеров, которые в состоянии обеспечить работу ГеоТЭС общей мощностью 30 тыс. МВт в течение 100 лет. По оценкам Рекса, дополнительные ресурсы такого типа только в западных (граничащих с Мексикой) штатах обеспечат производство 2,4 млн. МВт электрической энергии.

Промышленные геотермальные ресурсы могли бы еще более возрасти при дальнейшем развитии техники, когда станет возможным освоение ресурсов, нерентабельных в настоящее время с экономической точки зрения. Эти ресурсы оценены более чем в $4 \cdot 10^{22}$ Дж и достаточны для производства более 400 тыс. МВт электрической мощности в течение 50 лет [8]. Для предполагаемого увеличения используемых геотермальных ресурсов требуется:

1. Успешное применение методов производства электроэнергии на базе месторождений с промежуточными и низкими температурами (меньшими 180°C).

2. Разработка более совершенных методов закачки жидкостей в геотермальные месторождения, что позволит более полно и в течение более продолжительного времени использовать тепло, заключенное в породах и жидкостях этих месторождений.

3. Разработка методов искусственного стимулирования с целью увеличения производительности геотермальных месторождений, которые в сочетании с закачкой жидкости обеспечат извлечение тепла из сухих горячих пород.

4. Усовершенствование современных методов бурения и создание новых методов для экономически выгодного глубокого бурения.

5. Разработка новых способов более широкого использования низкотемпературных геотермальных ресурсов для обогрева помещений, в производственных процессах, сельском хозяйстве и т.д.

Так как указанные методы успешно развиваются, то промышленные геотермальные ресурсы возрастут в пределах, определяемых

общими запасами геотермальной энергии США. По оценкам Рекса [37], ресурсы месторождений горячей воды с промежуточными температурами и глубинных месторождений с преобладанием пара или горячей воды на западе США, на побережье Мексиканского залива, а также на Аляске и Гавайских островах могут обеспечить производство 12,6 млн. МВт электрической мощности в течение 100 лет. Кроме того, при успешной разработке и применении методов извлечения тепловой энергии из сухих горячих пород ресурсы возрастут настолько, что можно будет производить до 20 млн. МВт при бурении на глубины до 6 км и еще 40 млн. МВт при бурении на глубины от 6 до 10 км.

О вкладе геотермальной энергии в общие энергетические потребности США в ближайшие 30 лет можно судить по следующим оценкам установленной мощности ГеоТЭС:

Год	МВт
1972	192
1975	1500
1980	10 500
1985	19 000
1990	35 000
2000	75 000

На период 1975–1985 гг. приняты оценки Килкни [36], являющиеся по сути официальным мнением одной из немногих американских фирм, занятых разведкой, освоением и использованием геотермальных ресурсов и получающих при этом прибыль. Эти оценки установленной мощности соответствуют стоимости электрической энергии $6,25 \cdot 10^{-3}$ долл./кВт·ч и основаны на предположении, что развитие современной техники обеспечит экономически выгодное производство энергии из месторождений горячей воды, а также многоцелевое использование таких геотермальных ресурсов, как имеющиеся в долине Импириал-Валли.

Более развернутая, чем предложенная Килкни [36], правительственная программа исследования и освоения геотермальных ресурсов может ускорить разработку и применение новых методов, что позволит получить в 1985 г. большую установленную электрическую мощность, чем указанная выше. Оценки роста электрической мощности до 35 тыс. МВт в 1990 г. и до 75 тыс. МВт в 2000 г. получены в предположении, что при осуществлении развернутой правительственной программы работ будут обнаружены новые геотермальные месторождения и разработаны методы производства электрической энергии из геотермальных жидкостей с больших глубин, нагретых до меньших температур, в том числе из находящихся под высоким давлением рассолов побережья Мексиканского залива.

Успешная разработка и применение методов экономически выгодного извлечения тепловой энергии из месторождений с недостаточным количеством теплоносителей или с недостаточной проницаемостью пород может привести к еще большему увеличению мощности ГеоТЭС.

Оценки возможности использования рассолов побережья Мексиканского залива для производства электроэнергии приведены в работе [41], где проведен расчет блока ГеоТЭС мощностью 25 МВт. Параметры месторождения следующие: температура и давление воды на устье скважины 163°C и 13,8 МПа соответственно, расход воды 230 м³/ч, содержание метана в 1 м³ воды 7 м³. Рассмотрены две схемы преобразования тепловой энергии: с двукратным испарением и двухконтурная с использованием изобутана во втором контуре [41]. Для первой схемы получены следующие результаты (в расчете на один блок мощностью 25 МВт): удельные капитальные затраты 738 долл./кВт, число эксплуатационных скважин 8,5, извлечение метана $0,39 \cdot 10^6$ м³/сут, а для второй соответственно: 786 долл./кВт; 10,2 скважин и $0,46 \cdot 10^6$ м³/сут. Используемая вода при температуре 71°C и давлении 0,2 МПа закачивается в пласт на глубину 1825 м. Капитальные затраты на такую ГеоТЭС, работающую на термальных водах высокого давления, по расчетам оказались в 2 раза меньше, чем для ТЭС на ископаемом топливе. Кроме того, годовой доход от извлечения метана может составлять 90% дохода указанной ТЭС.

Порядок сдачи в аренду земель с геотермальными ресурсами в США

В настоящем разделе используются материалы отчета [11] и рассматривается решение конгресса США по устранению основного препятствия на пути освоения геотермальных ресурсов путем предоставления узаконенных полномочий министру внутренних дел предоставлять государственные земли в аренду с целью освоения геотермальных ресурсов. Рассматривается пригодность федеральных и частных земель. Приводятся требования к таким землям, а также геологическое описание различных источников геотермальной энергии.

ФЕДЕРАЛЬНЫЕ ЗЕМЛИ С ГЕОТЕРМАЛЬНЫМИ РЕСУРСАМИ

Министерство внутренних дел запретило проводить какие-либо подземные работы на 545 тыс. га федеральных земель, так как эта территория считается пригодной для освоения геотермальных ресурсов. Перечень этих земель в различных штатах официально был опубликован в 1967 г. и включает:

Земли с известными геотермальными ресурсами (~426 000 га)

Штаты Калифорния	339 600 га
Айдахо	6 480
Монтана	7 250
Невада	15 520
Нью-Мексико	56 800

Земли с потенциальными геотермальными ресурсами (~119 000 га)

Штаты Аляска	26 600 га
Калифорния	33 800
Айдахо	3 105
Невада	32 850
Орегон	13 980
Юта	4 400
Вашингтон	3 950

Одной из причин замедленного освоения геотермальных ресурсов в США было отсутствие до 70-х годов узаконенных полномочий на предоставление прав пользования государственными землями.

В декабре 1970 г. сенатом принят закон, предоставляющий такие полномочия министру внутренних дел США, причем порядок аренды государственных земель во многом аналогичен существующему порядку для месторождений газа и нефти.

Под понятием "ресурсы" в этом законе подразумеваются "геотермальный пар и другие сопутствующие геотермальные ресурсы". Ресурсы также включают энергию сухих пород, и при арендовании можно использовать любой другой побочный продукт, извлекаемый вместе с геотермальной энергией, за исключением нефти, углеводородов, газа и гелия.

Запрещено сдавать в аренду земли в национальных парках, вблизи национальных памятников, в зонах отдыха и в местах нереста рыбы, установленных министром внутренних дел, в заповедниках и зонах обитания диких животных, в зонах размножения водоплавающей птицы и специально выделенных зонах для защиты и сохранения отдельных видов рыб и животных, которым угрожает вымирание, а также в индейских резервациях и ряде других земель. Таким образом, не могут использоваться гейзеры и термальные источники, расположенные в национальных парках и в других указанных зонах, например гейзер "Олд фэйсфул" в Йеллоустонском национальном парке.

Площадь каждого из сдаваемых в аренду участков не должна превышать 1035 га, а общая площадь, которой может располагать арендатор в каком-либо одном штате, ограничена 8280 га. Через 15 лет министр внутренних дел может увеличить эту максимальную арендуемую площадь до 20 600 га. По существующему в США закону такое ограничение для угля составляет 18 900 га, а для нефти и газа — 99 300 га.

Если сдаваемая в аренду земля находится в "районе с известными геотермальными ресурсами", то разрешение на аренду должно предоставляться лицу, предложившему наивысшую цену. Если же в аренду сдается земля с необнаруженными геотермальными ресурсами, то разрешение на аренду предоставляется первому нанимателю по конкурентоспособной цене в соответствии с предписаниями министра внутренних дел. Такая процедура полностью дублирует порядок сдачи в аренду месторождений газа и нефти.

Все арендаторы геотермальных ресурсов платят арендную плату в размере не менее 10 и не более 15% от стоимости пара или другого теплоносителя, который извлекается во время арендования. Для побочных продуктов, кроме минерального сырья, для которого имеется специальный закон арендования, эти отчисления не превышают 5%. Годовая рента за землю не менее 2,5 долл. за 1 га и минимальная арендная плата за ресурсы 5 долл. за 1 га взимаются только после начала промышленной эксплуатации.

Каждое разрешение на арендование справедливо в течение 10 лет с момента его вступления в силу. По истечении этого срока и продолжении промышленной эксплуатации разрешение может быть продлено до 40 лет. Если же и после этого производство будет экономически выгодным, а земли не потребуются для других целей, то арендатор получит преимущественное право на возобновление арендования на следующие 40 лет.

Подобные условия арендования земель действуют и при осуществлении кооперативных или совместных планов.

Министр внутренних дел может изменить условия аренды геотермальных ресурсов (за исключением размеров ренты и арендной платы) не ранее чем через 10 лет, отсчитанных от даты, когда был впервые получен геотермальный пар. Ренту и арендную плату он может изменять только с интервалом не менее 20 лет, причем первое изменение возможно через 35 лет, отсчитанных от даты, когда был впервые получен геотермальный пар. Причем ни ренту, ни арендную плату нельзя увеличивать более чем на 50% по сравнению с предыдущим периодом, а арендная плата не может превысить своего первоначального

значения более чем на 22,5%. Арендатор должен быть предупрежден о предполагаемых изменениях.

В некоторых районах значительные количества воды, особенно пресной, можно получить только из геотермальных месторождений. Министр внутренних дел имеет право в некоторых случаях требовать производить или использовать такую воду. Такое производство должно соответствовать законам данного штата, касающимся использования воды.

ЗЕМЛИ С ГЕОТЕРМАЛЬНЫМИ РЕСУРСАМИ, НАХОДЯЩИЕСЯ В ЧАСТНОМ ПОЛЬЗОВАНИИ

Одиннадцать западных штатов США (Аризона, Калифорния, Колорадо, Айдахо, Монтана, Невада, Нью-Мексико, Орегон, Юта, Вашингтон и Вайоминг) занимают площадь 305 млн. га, из которых около половины (146 млн. га) находятся в распоряжении государственной администрации. Остальные земли (~59 млн. га) принадлежат двум другим владельцам — это земли штатов и частные земли. В данном разделе кратко рассматривается размещение этих земель и возможности освоения на них геотермальных ресурсов.

История освоения западных штатов США является ключом к пониманию принципа размещения частных земель и земель штатов. Большая часть частных земель расположена вдоль рек и других водных артерий, в долинах и других местах, удобных для занятий скотоводством и сельским хозяйством. Многие же гористые и непригодные для сельского хозяйства районы являются федеральными землями, за исключением районов с развитой горной промышленностью.

Железные дороги, такие, как "Юнион пасифик" в штатах Колорадо, Вайоминг и Юта, до сих пор сохраняют права на минеральные ресурсы на участках, примыкающих к этим дорогам. В южных районах западных штатов земли были переданы в частное владение еще до образования штатов, когда эта территория принадлежала Испании. В ряде штатов (в основном в Аризоне) имеется особая категория земель-резерваций для индейцев, которые можно арендовать у них, как у частных владельцев.

Земли, принадлежащие штатам, включают территории или участки, переданные им во время их образования. Но так как в рассматриваемый район входят в среднем от двух до четырех таких участков из 36, то процент таких земель является невысоким. Например, штату Юта принадлежит лишь 9% из 1,8 млн. га его территории, а штату Колорадо — ~6% из 1,6 млн. га. Причем земли штатов обычно сильно раздроблены.

Расположение земель, не принадлежащих государству, в различных штатах таково: шт. Аризона — юго-восточная, центральные восточная и западные части; шт. Калифорния — побережье и некоторые другие области во внутренних долинах; шт. Колорадо — восточная часть, а также горные районы и долины рек; шт. Айдахо — восточная и юго-восточная части, долина реки Снейк и западная часть северного длинного узкого выступа территории между двумя другими территориями; шт. Монтана — восточная часть Скалистых гор и долины западных рек; шт. Невада — долины рек и область Рино, причем в обеих областях, не принадлежащих государству, земель мало; шт. Нью-Мексико — восточная и центральная части, долина реки Рио-Гранде и земли, примыкающие к северной границе; шт. Орегон — долины рек Колумбия и Уилламетт, юг центральной и восточной частей; шт. Юта — зона, простирающаяся от плато Уосач с севера на юго-запад и вдоль железной дороги в северной части; шт. Вашингтон — прибрежные районы, долина реки Колумбия, центральная и юго-восточная части; шт. Вайоминг — восточная треть, западная долина реки и вдоль железной дороги в южной части.

Концентрация земель штатов и частных земель в наиболее освоенных районах и в районах с высокой плотностью населения исключает возможность сдачи их в аренду для разработки геотермальных ресурсов. Тем не менее имеются земли, которые можно арендовать, но их нахождение в частной собственности и в собственности штатов создает определенные трудности. Подобное арендование является совершенно новым делом. В шт. Юта удалось арендовать некоторые частные земли для освоения геотермальных ресурсов на условиях, подобным условиям арендования минеральных ресурсов. Срок сдачи 10 лет, что обеспечивает сравнительно низкий уровень арендной платы и прочих расходов.

Арендная плата составляет 5% от размера начального производства, как в случаях горных разработок, а не 12,5%, как при арендовании месторождений газа и нефти. Более высокая начальная стоимость геотермальных разработок была принята с целью снижения арендной платы. Однако сроки и порядок арендования отличаются столь сильно, что практически нет способа определения действительных сумм платежа, если не проводится специальная оценка. Это же касается и арендования земель штатов, так как не существует правил такого арендования как для районов с сухими, так и гидротермальными системами.

Некоторые штаты используют порядок арендования государственных земель (которого в данном случае не существует), другие уста-

навливают свой собственный порядок. Представляется целесообразным, чтобы каждый штат принимал порядок арендования и размеры арендной платы, действующие при горных разработках. Арендование земель штатов, как и земель, находящихся в частной собственности, в основном является делом переговоров, которые следуют после определения границ представляющих интерес участков и выявления их владельцев. Ежегодная арендная плата и прочие расходы при арендовании земель штатов сильно колеблются, и предсказать действительные цены поэтому невозможно.

Итак, владельцами земель в западных штатах США являются государство, штаты и частные лица. Освоение геотермальных ресурсов можно начинать только после сдачи этих земель в аренду, но порядки арендования во всех трех случаях различны.

Сведения об основных геотермальных установках

Этот раздел основан на материалах отчета [43] и дополнен данными 1972–1977 гг., опубликованными в периодической печати и в трудах конференции, состоявшейся в 1975 г. в Сан-Франциско [6].

ИСЛАНДИЯ

В Исландии геотермальные месторождения достаточно удалены друг от друга, причем имеются как низкотемпературные, так и высокотемпературные месторождения. Последние концентрируются в зоне вулканической активности четвертичного периода, являющейся продолжением гребня Срединно-Атлантического хребта, пересекающего страну с юго-запада на северо-восток. Страна богата термальными источниками. Их энергия в основном используется для обогрева зданий и теплиц. Опытная ГеоТЭС мощностью 2,5 МВт работает вблизи озера Миватн.

Расположение геотермальных месторождений. Большая часть наиболее активных месторождений расположена в зоне, пересекающей страну с юго-запада на северо-восток. Как указывалось, эта зона является продолжением гребня Срединно-Атлантического хребта. В Исландии имеются области с низкотемпературными (ниже 150°C) и высокотемпературными геотермальными водами. Освоение низкотемпературных месторождений сконцентрировано вокруг Рейкьявика.

Достаточно хорошо изученными высокотемпературными месторождениями являются месторождения в Рейкьянесе на юго-западе страны и в Намафьядле на севере Центральной части острова. Первое

из них может служить для получения из раствора различных химических элементов. Второе освоено как источник тепла для производства диатомита из озера Миватн. С этой установкой связана экспериментальная ГеоТЭС мощностью 2,5 МВт.

Геология. В Исландии доминируют вулканические горные породы — базальты, андезиты и риолиты. Потоки базальтовой лавы третичного периода обнаружены в западных, восточных, на севере центральных районов и на северо-западе Исландии. Разделяют эти районы более молодые вулканические породы четвертичного возраста — базальтовые туфы, палагонитовые брекчии и лавовые потоки.

Исландия богата энергией. Хотя освоено всего лишь 5% имеющейся в наличии гидроэнергии, но интенсивно используются геотермальные ресурсы. В основном их применяют для обогрева помещений. Электроэнергию производит только ГеоТЭС около озера Миватн.

Производство. Около 75 тыс. жителей Рейкьявика живут в домах, обогреваемых термальными водами. Открытие нового месторождения в Эллидааре вблизи Рейкьявика было причиной отсрочки проекта сооружения трубопровода для транспортировки высокотемпературного пара из более удаленного месторождения в Хенгидле. Было установлено, что сжигание жидкого топлива для подогрева низкотемпературного пара оказывается экономически выгодным в периоды повышенной потребности в энергии.

Скважины бурят с помощью роторного бурения, а их обсадка производится только на первых 50–100 м. Работа систем извлечения, сбора и распределения термальных вод автоматизирована. Стоимость этой энергии для домовладельца составляет ~0,09 цент/МДж, из которых 66% приходится на стоимость распределения. Стоимость обогрева при использовании жидкого топлива в данном районе примерно вдвое выше.

В районе Хверагерди расположены самые большие в стране обогреваемые термальными водами теплицы площадью 105 тыс. м², в которых выращивают почти весь урожай помидоров, огурцов и салата. Третья часть всех теплиц используется для выращивания цветов.

Принадлежащая правительству исландская фирма "Кизильдьян" совместно с фирмой "Джонс Мэнвилл" в 1966 г. соорудила опытную установку по добыче диатомита около озера Миватн. В 1967 г. производство его составляло 12 тыс. т в год, но уже в 1970 г. оно было удвоено.

ГеоТЭС. В 1959 г. фирма "Лакса пауэр уокс" построила ГеоТЭС мощностью 2,5 МВт. Эта расположенная вблизи озера Миватн уста-

новка имеет выброс в атмосферу, и поэтому использует лишь небольшую часть энергии, содержащейся во влажном паре. Для увеличения перепада давлений при расширении пара можно добавить конденсатор. Турбина работает при давлении на входе 1,014 МПа и при противодавлении 0,123 МПа. При этом для производства 1 кВт · ч электроэнергии затрачивается 42,2 МДж тепловой энергии. Лопатки турбины изготовлены из специального сплава с содержанием 10% хрома и 35% никеля.

Пар получают из четырех продуктивных скважин глубиной ~1000 м каждая. Используется роторное бурение. Диаметр обсадки скважин: 406 мм на глубину до 30 м, 244 мм — до 200 м и 186 мм — до 600 м.

Перспективы. В Намафьяdle около озера Миватн сооружается город. Предполагается транспортировать горячую воду (~183°C) из установленных на устье скважин сепараторов по трубам под действием силы тяжести на расстояние 3 км. Для исключения коррозии трубопроводов в системах обогрева помещений под действием воды с высоким содержанием серы планируется установить теплообменник, чтобы к домам подводилась нагретая пресная вода. На севере Исландии к 1977 г. должна была быть сооружена ГеоТЭС мощностью 55 МВт. Если сейчас геотермальная энергия обеспечивает ~50% всей потребности в энергии для отопления, то к 1980 г. планируется довести эту цифру до 70%.

ИТАЛИЯ

Месторождение в Лардерелло обеспечивает получение из сухого перегретого пара ~400 МВт электрической энергии. Сравнительно новое месторождение в Монте-Амиата также оказалось весьма перспективным. Оба месторождения расположены в гряде гор, тянущихся с севера на юг вдоль западного побережья Италии.

Расположение. Месторождения находятся на расстоянии ~60 км южнее городов Пиза и Флоренция. Одно из них, в Лардерелло, имеет площадь ~90 км², другое, в Монте-Амиата, ~40 км².

Геология. Месторождение в Лардерелло расположено под слоем неогеновых отложений — формаций типа флиша, которые составляют водонепроницаемый слой. Само месторождение образовано известняками и доломитами, пронизано трещинами и может рассматриваться как тектонически поднятый блок. Ниже расположена область с пониженной силой тяжести из-за присутствия кислых магматических пород на глубине 6–8 км. Вода получает тепло от магматической массы через боковые породы основания. Структура месторождения в Монте-Амиата во многом сходна. Градиенты температуры составляют до 50°C/100 м. Электрическое сопротивление, определенное до глубины 1000 м, оказалось более 100 Ом · м.

Месторождение в Монте-Амиата является, возможно, единственным геотермальным месторождением, не имеющим никаких поверхностных термальных проявлений. Тем не менее оно оказалось весьма обширным, и здесь продолжается бурение скважин.

Использование. Большая часть скважин имеет глубину менее 1000 м и дает пар с весовым содержанием газов до 5%. Температура на устье скважин колеблется от 150 до 260 °С, причем с течением времени температура обычно возрастает. Средний расход изменяется в пределах 50–100 т/ч. Давление при закрытых скважинах изменяется от 0,61 до 4,22 МПа. Лишь на совсем новых скважинах месторождения в Травале максимальные давления составляют 5,9–6,1 МПа. Месторождения в Монте-Амиата (Италия), Долине Больших Гейзеров (США) и Мацукаве (Япония) являются единственными в мире, дающими сухой пар.

Диаметры скважин больше, чем в Новой Зеландии, и в основном равны 340 мм. При бурении обычно используют тяжелый глинистый раствор, и всегда устанавливают специальные превенторы, предотвращающие выбросы. Расход жидкости при бурении является показателем того, достигнут ли производительный слой. Обсадные трубы тщательно цементируются.

С декабря 1969 по март 1975 г. в Лардерелло было пробурено 20 новых продуктивных скважин. Когда скважина пробурена, то вначале расход ее начинает быстро падать, достигая асимптотически определенного установившегося значения. В Лардерелло, очевидно, наступило равновесие с питающими месторождение водами, и поэтому не следует ожидать увеличения его производительности. Было бы интересно провести закачку отработанных вод в продуктивные горизонты месторождения. Геологи предполагают, что с момента поступления поверхностных вод в пласты до их выделения в виде пара проходит около 40 лет. Температуры пара на входе в ГеоТЭС здесь изменяются от 140 до 190 °С.

За последние годы (1972–1977) проводилась интенсивная разведка нового геотермального месторождения в Радикондоли, расположенного на 10–15 км юго-восточнее Лардерелло. Предварительно здесь на площади 70 км² было пробурено 27 исследовательских скважин на глубины 25–200 м. Подробно была изучена работа шести скважин глубиной 630–1480 м. Хотя во всех шести скважинах температура превысила 270 °С, лишь три из них оказались продуктивными. Интересно также, что состав жидкости, полученной из двух рядом расположенных скважин, оказался различным.

ГеоТЭС. При удаленных от ГеоТЭС изолированных скважинах используются неконденсационные турбины. Они просты и надежны, а

для выработки 1 кВт электрической мощности требуется около 20 кг пара при давлении 0,47 МПа и температуре 185 °С. Целесообразно использовать этот цикл при высоких содержаниях газов (до 30 вес.%). Удаление же газов в конденсационном цикле весьма сложно. В новом неконденсационном цикле (мощностью 15 МВт) расход пара составил 13,8 кг на 1 кВт·ч электрической энергии.

В конденсационном цикле расход пара составляет 10 кг/кВт·ч. Конденсация пара осуществляется водой, охлаждаемой в больших башенных градирнях. Общая установленная мощность составляет 470 МВт, а в процессе эксплуатации получают ~400 МВт. Как указывалось, не следует ожидать дальнейшего роста мощностей в Лардерелло, так как производительность месторождения находится в равновесии с поступающей в него водой. Производимая на основной ГеоТЭС электрическая мощность намного превышает полезную мощность, что связано с затратами значительной ее части (20%) на работу насосов для неконденсирующихся газов.

НОВАЯ ЗЕЛАНДИЯ

Большое месторождение термальных вод и пара находится в Уайракее. Горячая вода отделяется от пара и вскипает при низком давлении. Здесь вырабатывается ~180 МВт электрической мощности. Производительность нового месторождения в Бродлендсе достаточна для выработки аналогичной мощности.

Расположение. Месторождение в Уайракее является частью большого геотермального поля, простирающегося от озера Таупо до Роторуа. Оно занимает территорию шириной ~32 и длиной ~240 км. Расположено оно в грабене. Район изобилует выходами пара и кратерами кипящей грязи, и поэтому о нем было известно уже очень давно.

Геология. Месторождение покрыто рядом слоев. Верхний слой мощностью ~90 м состоит из легкой пемзы, ниже расположен второй слой из непроницаемого, плотного, тонкозернистого песчаника и аргиллита мощностью 30–60 м. Следующий слой состоит из пористой трещиноватой массы – сцементированной и растрескавшейся пемзы и риолита. Еще ниже расположен слой массивного игнимбрита мощностью ~600 м. Игнимбриты представляют собой плотные породы, образовавшиеся при высокой температуре в процессе извержения при спекании и уплотнении оседавших раскаленных частиц. Возраст месторождения около 500 000 лет. В этом районе происходили интенсивные сбросы. Полагают, что именно они являются теми уходящими в глубину проницаемыми зонами, по которым горячие флюиды поднимаются к поверхности.

Использование. Продуктивные скважины в этом регионе дают пароводяную смесь. Около половины скважин работает при давлении 0,55 МПа, остальные — при 1,24 МПа. Наибольшая глубина скважин 1220 м, наименьшая — 170 м. Средняя глубина продуктивных скважин 670 м, а диаметр 203 мм. Средняя производительность пара 21,8 т/ч, а максимальная — 655 т/ч. Пар подводится к зданию ГеоТЭС по трубопроводу длиной 3660 м. Максимальная температура пара 260°C. Расположение скважин с интервалом в 27 м, по-видимому, не сказывается на их производительности. Было отмечено общее снижение температуры и давления, однако предполагают, что выработку энергии можно поддержать на прежнем уровне, если использовать большую долю сбрасываемой горячей воды, вызывая ее вскипание с целью получения пара. В целом используется лишь ~7% всего геотермального тепла.

Участок бурения укрепляют путем закачки в грунт до начала бурения примерно 65 т цемента для образования бетонной подушки. Чтобы избежать выброса жидкости и пара используют тяжелые буровые растворы. Циркуляция раствора обычно нарушается при вскрытии продуктивных формаций. Для предотвращения выброса пароводяной смеси используют превенторы.

Из скважин получают 80% воды и 20% пара. Вода после ее отделения от пара вскипает с образованием пара низкого давления. Используются три системы трубопроводов: для пара высокого давления (1,1 МПа), для пара промежуточного давления (0,356 МПа) и для пара низкого давления (0,014 МПа).

ГеоТЭС. Максимальная установленная мощность составляет 240 МВт, а вырабатывается ~180 МВт (по более точным данным 193 МВт), что определяется производительностью пара. Полагают, что последняя ограничена поступлением перегретых вод. Попытки закачивать воду в месторождение здесь не предпринимались. Пар с тремя различными давлениями подается в отдельные турбины, а конденсация осуществляется в системе охлаждения, работающей на речной воде. Большая часть горячей воды (~80%) сбрасывается по бетонированным траншеям в реку. При охлаждении воды в траншеях образуются силикатные отложения, которые ежегодно необходимо удалять. На турбинах аналогичных отложений не обнаружено, причем одна турбина проработала 12 лет и была в хорошем состоянии. Содержание неконденсирующихся газов низкое (0,26 объемн.%), и их удаляют с помощью пароструйного эжектора. Широко используемые здесь углеродистые стали являются коррозионно-устойчивыми при условии, что неиспользуемое оборудование предохраняется от воздействия кислорода.

Перспективы. Хотя стоимость геотермальной энергии низка и было открыто новое месторождение в Бродлендсе, в 1972 г. не предполагалось строить новых ГеоТЭС. Было открыто месторождение природного газа недалеко от берегов Новой Зеландии. Стоимость его освоения составила 150 млн. долл. Предполагалось, что это повлечет за собой в ближайшие годы сооружение новых электростанций, работающих на газе, и это замедлило развитие геотермальной энергетики вплоть до 1975 г. Но в настоящее время интерес к геотермальной энергии снова возрос. Сооружается ГеоТЭС в Бродлендсе (50 км южнее Роторуа), которая должна войти в энергосистему Новой Зеландии к 1981 г. [28]. Стоимость ГеоТЭС оценивается в 60 млн. новозеландских долларов. Ее максимальная мощность 150 МВт, и вместе с ГеоТЭС в Уайракее (192 МВт) она обеспечит большую часть нагрузки Северного острова. Запасы геотермального региона от Бродлендса до Роторуа оцениваются в 500 МВт. Предполагаемая продолжительность эксплуатации ГеоТЭС в Бродлендсе 30 лет; число скважин здесь составляет 125, а максимальная температура воды в месторождении 307°C. По последним данным мощность ГеоТЭС в Бродлендсе может составить 200 МВт, а срок ее службы — 47 лет. Разведочные работы велись в Бродлендсе 6 лет, а их стоимость составила 6 млн. новозеландских долларов. ГеоТЭС будет выбрасывать ~2600 т/ч горячей воды, которая будет либо сбрасываться в реку Уайткато (с охлаждением или без него), либо закачиваться вновь в месторождение. Первая установка в Бродлендсе мощностью 90 МВт должна войти в строй в октябре 1981 г., а третья — к октябрю 1983 г.

ЯПОНИЯ

На островах Японии имеется много регионов со значительными проявлениями геотермальной активности. На двух из них, Кюсю и Хонсю, работают ГеоТЭС соответственно в Отаке (мощность 13 МВт) и в Мацукаве (мощность 20 МВт). Опыт эксплуатации этих установок показал, что они имеют высокий коэффициент использования мощности, 96–97%, и не требуют особого ухода. На установке в Мацукаве наблюдается несколько повышенная кислотность, вызывающая коррозию, но в то же время отложение накипи минимально. На установке в Отаке кислотность ниже и не существует проблемы борьбы с коррозией; отработанную горячую воду выдерживают в течение часа для осаждения кремнезема.

Расположение геотермальных месторождений. Перечень основных геотермальных месторождений Японии приведен в табл. 1.5. Хотя

Таблица 1.5

Основные геотермальные месторождения Японии [43]

Месторождение	Остров	Площадь, км ²	Общий тепловой поток, МВт
Атосанупури	Хоккайдо	0,9	32,6
Сункио	"	0,8	7,95
Ноборибецу-Юнума	"	0,07	80,8
Ноборибецу-Цигокудани	"	0,1	47
Шова-Шиндзян	"	(0,1)	(12,5)
Нигорикава	"	3,6	12,5
Сикабе	"	0,3	4,2
Тамагава	Хонсю	0,1	63,5
Мацукава	"	0,2	(128)
Кусацу	"		102
Хаконе-Овакудани	"	0,06	20
Беппу	Кюсю	7	156
Отаке	"	0,1	186,5
Обама	"	1,5	219

известно о наличии в Японии около 1300 термальных источников и фумарол, здесь перечислены только те из них, на которых проводится или предполагается проводить освоение геотермальных ресурсов.

Геотермальные месторождения на редкость благоприятно распределены на островах Хоккайдо, Хонсю и Кюсю. Остров Сикоку является единственным из четырех основных японских островов, на котором имеются лишь термальные источники. Причем большая часть этих источников расположена вдоль вулканических зон четвертичного периода и их энергия связана с проявлениями вулканической активности.

Геология. Япония расположена в тихоокеанской орогенной зоне горообразований на границе между континентом и Тихим океаном. В третичный период на большей части японского архипелага произошло интенсивное образование тектонических разломов. За этим последовал период вулканических извержений, в результате которых лавы и туфы заполнили большой геосинклинальный бассейн. Эти туфы представляют собой характерную разновидность с зелеными пятнами и называются "зелеными туфами", а сам геосинклинальный бассейн — область "зеленых туфов".

Над туфами лежит мощный слой морских отложений. Позднее произошли интрузии гранитов в толщу "зеленых туфов" с образованием дополнительных разломов. К концу третичного периода большая

часть областей "зеленых туфов" приподнялась. Во время четвертичного периода произошло более глубокое растрескивание и образовались новые вулканы. В этот период действовало около 265 вулканов, из которых 50 являются действующими и поныне. Они вытянулись двумя цепочками: восточная — от острова Хоккайдо через северо-восточную Японию и западная — от острова Кюсю через острова Рюкю к острову Тайвань.

Геотермальные месторождения получают тепло от вулканов четвертичного периода. Большая часть этих месторождений связана с вулканическими зонами. Термальные источники обычно поднимаются от фундамента, состоящего из "зеленых туфов", хотя некоторые из них встречаются в областях палеозойских и мезозойских формаций и гранитов.

Особенности производства К настоящему времени освоены два геотермальных месторождения Японии: в Мацукаве на северо-востоке острова Хонсю, и в Отаке на севере центральной части острова Кюсю действуют ГеоТЭС.

ГеоТЭС в Отаке работает с августа 1967 г., имеет мощность 11 МВт и потребляет 110 т/ч пара. Вначале было пробурено 5 продуктивных скважин, но через три года одна из них была закупорена отложениями углекислого кальция.

Освоение месторождения в Отаке было начато в 1950 г. фирмой "Кюсю электрик пауэр". За период 1963—1966 гг. было пробурено 5 продуктивных скважин, а в августе 1967 г. ГеоТЭС дала ток. Сейчас здесь имеется 9 продуктивных скважин и 3 скважины для закачки.

Породы основания этого геотермального месторождения состоят из двупироксенового андезита, из двупироксеновой андезитовой лавы, содержащей роговую обманку, и сопутствующей туфовой брекчии. Это основание перекрыто вулканическим комплексом Кидзю, в основном состоящим из андезита с роговой обманкой.

Геофизическая разведка месторождения была проведена с использованием магнитных, электрических и гравитационных методов. Результаты разведки показали, что площадь, приблизительно равная $1,5 \times 3$ км², подверглась гидротермальному воздействию на глубину до 800—1000 м.

Месторождение в Отаке дает пароводяную смесь с весовым содержанием пара 25% при средней глубине скважин ~450 м. Скважины бурятся с помощью турбобуров и обычно имеют обсадку на глубину до ~250 м при ее диаметре 220 мм. Пар отделяется во вращающемся

сепараторе, расположенном на устье скважины. Затем пар по трубам поступает в бак, проходит через турбину, вакуумный эжектор (для удаления неконденсирующихся газов), барометрический конденсатор и охлаждается в трех вентиляторных градирнях.

Ряд трудностей, связанных с коррозией, вызываемой содержащимся в паре SO_2 , был устранен после установки вакуумного эжектора. Из-за значительного содержания SiO_2 происходило его отложение в линиях горячей воды. Установка улавливающего бака с перегородками позволила решить и эту проблему. Во время пребывания жидкости в этом баке в течение часа происходит осаждение SiO_2 . Осадок из нижней части бака через открытый канал удаляется в реку Кюсю. Один раз в год турбину останавливают для осмотра и для удаления SiO_2 струйной промывкой водой. В настоящее время эту операцию стали проводить раз в два года, так как рабочие характеристики системы, работающей при коэффициенте использования мощности 96%, оказались хорошими. Перепад давлений на турбинах составляет от 250 на входе до 10 кПа на выходе, при начальной температуре 127°C и расходе пара 110 т/ч. На станции в Отаке принимались меры по борьбе с коррозией путем ввода каустической соды в линию охлаждающей жидкости и выбора соответствующих антикоррозионных материалов. С марта 1972 г. в Отаке производится закачка использованного вод в недра месторождения, и к 1975 г. через три предназначенных для этого скважины было закачено 8 млн. т воды. При этом отмечено увеличение расхода пара через продуктивные скважины. Никаких колебаний почвы и землетрясений при этом не возникало. В 1975 г. в Отаке было выработано 69 276 МВт · ч электроэнергии при общем числе часов работы 8231 [44].

Освоение месторождения в Мацукаве проводилось фирмой "Джэпэн метлз энд кемикэлз" и Геологической службой Японии. Первые скважины были пробурены в 1952 г., а интенсивная программа разведочных работ стала осуществляться с 1956 г. В 1964–1965 гг. здесь были пробурены четыре продуктивные скважины, а с 1966 г. работает ГеоТЭС мощностью 20 МВт. Породами основания здесь являются палеозойские и кремнистые сланцы. Над ними лежат зеленые туфы и образования песчаника и глинистого сланца формации Ямоцуда третичного периода, а затем дацитовый туф и дацитовая лава также третичного периода. Самые верхние слои являются вулканическими породами четвертичного периода, преимущественно андезитами.

С помощью турбобуров здесь было пробурено четыре продуктивные скважины на глубину ~1000 м. Обсадка стандартная при диамет-

рах обсадных труб 406 мм до глубины 30 м, 300 мм до глубины 250 м и 220 мм до глубины 500 м. Некоторые скважины дали перегретый пар.

Отличительными особенностями турбины являются наличие стелитовых антикоррозионных покрытий поверхностей на входе пара в двух последних ступенях, специальных лопаток для извлечения влаги, а также пазов для удаления конденсата из входных сопел.

В июне 1974 г. введены в эксплуатацию ГеоТЭС в Онума мощностью 10 МВт и в Оникобе мощностью 25 МВт.

Перспективы. В стадии строительства находятся две ГеоТЭС по 50 МВт в Хачобару и Такиноуэ. С вводом их в строй мощность ГеоТЭС Японии составит 170 МВт. Хачобару расположено в нескольких километрах южнее Отаке на острове Кюсю. Здесь завершено бурение шести скважин. Бурение еще четырех скважин должно было быть закончено в 1977 г. Расход пара составит 500 т/ч, а мощность ГеоТЭС 50 МВт. Станция должна была быть введена в эксплуатацию в 1977 г. [44]. В будущем мощность работающих здесь установок возрастет до 150 МВт и более. Скважины имеют глубину ~1000 м и дают пароводяную смесь с содержанием пара 33 вес.%. В Хачобару будет использоваться не только первичный пар, но также и вторичный, образующийся при вскипании первичной перегретой воды. Это даст возможность увеличить полезную мощность на 15–20%. Хотя затраты на сооружение станции увеличатся на 5%, стоимость 1 кВт · ч электроэнергии уменьшится на 10–15%. Понизится на ~11% сброс воды, и снизится ее температура. Давление на входе в турбины станет на 30% выше, что даст возможность использовать трубы меньшего размера в системе сбора пара. Давления на входе в турбины: для первичного пара 0,69 МПа, а для вторичного 0,11 МПа. Установка в Хачобару является прототипом более мощной ГеоТЭС (до 200 МВт), сооружение которой намечено на ближайшие годы.

В настоящее время изучается возможность строительства ГеоТЭС на 15 геотермальных месторождениях. Продолжается исследование геотермальных ресурсов 30 наиболее перспективных районов Японии по ранее намеченной программе. Разрабатывается технология бурения скважин на глубину 3–4 км для использования термальных вод с температурой ~400°C.

Продолжается освоение нескольких геотермальных месторождений на острове Хоккайдо. Наиболее перспективными из них являются Сикабе, расположенное в вулканической зоне Насу, а также Шова-Шиндзэн и вулканическая зона Токачи-Дайзецу.

Наиболее перспективными месторождениями на острове Хонсю являются Оникобе и Ошираке. В Оникобе было пробурено 10 скважин. Одна из них производит 20–30 т/ч перегретого пара с глубины 500 м.

В 1974 г. фирма "Мицубиси метл" должна была ввести в действие электростанцию на геотермальном паре в префектуре Акита для снабжения завода по электролизу цинка. Это третья ГеоТЭС Японии и первая, предназначенная для производства цветных металлов. В конце 1973 г. здесь проведено испытание трех продуктивных скважин, способных обеспечить выработку 6,5 МВт электрической мощности. Скважины расположены в горах на побережье Японского моря. Пробурена и четвертая скважина. В целом мощность от всех скважин должна обеспечивать около пятой части потребностей завода в энергии, составляющих 40 млн. кВт.

ДОЛИНА БОЛЬШИХ ГЕЙЗЕРОВ (шт. КАЛИФОРНИЯ, США)

Месторождение в Долине Больших Гейзеров является крупнейшим геотермальным месторождением в мире ($\sim 52 \text{ км}^2$). Это одно из трех месторождений мира, дающих сухой перегретый пар. В 1972 г. электрическая мощность ГеоТЭС составляла здесь 192 МВт, а в 1975 г. — 502 МВт. В целом здесь предполагается довести уровень мощности до 1000–4000 МВт. В 1977 г. работало 15 установок, а мощность местных ГеоТЭС превысила 900 МВт. Ежегодно до 1983 г. должно вводиться в строй по одной установке мощностью $\sim 100 \text{ МВт}$. Это позволит довести общую мощность до 1400 МВт. В настоящее время для обеспечения такой мощности потребовалось бы 7150 т жидкого топлива. Потенциал парового бассейна в этом месторождении составляет 1600 МВт.

В табл. 1.6 и 1.7 приведены данные по установкам до 1978 г. включительно и планы фирмы "Пэсифик гэз энд элвктрик" до 1981 г. [7, 31]. Эта фирма проводит все работы в Долине Больших Гейзеров.

Расположение. Долина Больших Гейзеров находится в прибрежной зоне шт. Калифорния на расстоянии около 140 км севернее Сан-Франциско. Она занимает территорию $\sim 52 \text{ км}^2$. Почти все пробуренные здесь скважины оказались продуктивными. Точных данных о размерах и запасах этого месторождения пока нет.

Геология Месторождение в Долине Больших Гейзеров сложено серой дымчатой ваккой францисканской серии. Сама вакка имеет малую пористость, но сильную трещиноватость и в общей массе сильно проницаема.

Таблица 1.6

Планы и действительные данные по установкам в Долине Больших Гейзеров [7, 31]

Номер установки	Год ввода в эксплуатацию	Мощность данной установки, МВт	Суммарная мощность, МВт	Капитальные затраты, млн. доп.	Суммарные капитальные затраты, млн. доп.
1	1960	11	11		
2	1963	13	24	4,01	4,01
3	1967	27	51		
4	1968	27	78	7,61	11,62
5	1971	53	131		
6	1971	53	184	12,756	24,376
7	1972	53	237		
8	1972	53	290	10,982	35,358
9	1973	53	343		
10	1973	53	396	13,52	48,878
11	1975	106	502	14,404	63,282
12	1977	106	608	14,727	78,009
13	1976	135	743	20,217	98,226
14	1977	110	853	16,35	114,576
15	1977	55	908	11,303	125,879

Таблица 1.7

Планы фирмы "Пэсифик гэз энд элвктрик" относительно сооружения электростанций разных типов до 1981 г. (Мощность, МВт) [7, 31]

Дата ввода в эксплуатацию	Гидроэлектростанции	ГеоТЭС	Атомные станции	ТЭС на ископаемых топливах	Общая мощность
1975		106		208	314
1976			1060	164	1224
1977		271	1060		1331
1978		135		87	222
1979		110		120	230
1980		110		990	1100
1981	1125	110			1235
Суммарная мощность	1125	842	2120	1569	5656

Вероятнее всего, источник тепла является вулканическим, так как этот прибрежный гористый район характеризуется проявлениями недавнего вулканизма. По теории Факка месторождение Долины Больших Гейзеров представляет собой изолированный бассейн, формирующий слабопроницаемую кровлю за счет отложения минеральных солей и термального изменения верхних слоев серой вакки. При бурении был обнаружен крупный разлом и весьма вероятно, что именно он обеспечивает доступ воде к вулканическому теплу на глубине. Существует мнение, что по крайней мере 90% образующегося пара имеет атмосферное происхождение.

Недавно сообщалось о результатах новых исследований, проведенных в Долине Больших Гейзеров [6]. Профили температур по глубине двух скважин с обсадкой оказались здесь почти линейными. Это говорит о том, что тепло передается проводимостью, а возраст месторождения составляет по меньшей мере несколько тысяч лет. Исследования показали также, что здесь можно получать горячую воду и пар на значительно большей территории, чем известная и освоенная в настоящее время.

Производство. Обычно здесь применяется пневматическое бурение. Глубина скважин составляет 300–2100 м. При бурении получены рекордные результаты: 70 продуктивных скважин при 5 непродуктивных. В месторождении содержится очень мало подземных вод, так как породы верхнего слоя непроницаемы.

Обсадка скважин производится до глубин 210–370 м. Диаметры обсадных труб 240–340 мм. Для многих скважин обсадка на большие глубины не производится, за исключением тех случаев, когда встречаются большие количества подземных вод.

Пар ГеоТЭС поставляет фирма "Юнион ойл". Стоимость электроэнергии составляет $2,9 \cdot 10^{-3}$ долл./кВт·ч. При этом средний доход от одной скважины равен 240 долл./сут. При закрытых скважинах давление на устье составляет 1,42–3,2 МПа. Максимальный расход пара из одной скважины ~ 100 т/ч при давлении 0,75 МПа.

ГеоТЭС. Первые две установки (№ 1 и 2) производили вместе 24 МВт мощности, а стоимость электроэнергии составляла $5,65 \cdot 10^{-3}$ долл./кВт·ч. Установки № 3 и 4 производили уже по 27 МВт каждая при стоимости электроэнергии $4,71 \cdot 10^{-3}$ долл./кВт·ч. Установки № 5 и 6 производят по 53 МВт каждая, а стоимость 1 кВт·ч еще более низкая. Тем не менее стоимость энергии по данным работы [45] для типичной ГеоТЭС мощностью 110 МВт в настоящее время

составляет $\sim 9 \cdot 10^{-3}$ долл./кВт·ч. Ранее в установках использовались градирни и барометрические конденсаторы. Используемую воду стали теперь закачивать в продуктивную формацию. Результаты закачки оказались успешными: дебит соседних скважин перестал понижаться.

Пар перед установками очищается от твердых частиц. Содержание неконденсирующихся газов невелико (для новых скважин 1–2 вес.%) и еще более понижается в ходе эксплуатации. Турбину мощностью 110 МВт, введенную в эксплуатацию в мае 1975 г., поставила японская фирма "Тосиба". Турбина рассчитана на расход пара 820 т/ч с параметрами на входе 0,785 МПа, 179°C и количеством неконденсирующихся газов 0,1–2,2%. Конденсатор в этой установке смешивающего типа и оборудован паровым эжектором с расходом пара 34 т/ч. Скорость вращения ротора турбины 3600 об/мин, длина лопаток последней ступени 518 мм. Ротор турбины изготовлен из хромомolibденовой стали, рабочие и направляющие лопатки — из хромистой стали, корпус — из обычной углеродистой стали.

МЕКСИКА

Примерно в 30 км южнее границы с США в Мексиканской долине вблизи вулкана Серро-Прието расположено геотермальное месторождение, пар из которого используется для работы ГеоТЭС [46]. Геологи обнаружили здесь проявления геотермальной активности и пробурили первые скважины в 60-х годах. Достаточное для промышленного производства количество пара и воды было обнаружено уже на глубинах порядка 600 м. В период 1964–1971 гг. было пробурено более 16 продуктивных скважин. Глубина их различна, но в среднем составляет 1300 м.

Скважины дают пароводяную смесь со средним расходом 200 т/ч. Отношение расходов воды и пара составляет 0,5 : 1 — 4 : 1, а энтальпия смеси 930–1400 кДж/кг. Минимальная температура на забое скважин равна 370°C, а давление достигает 11,7 МПа. ГеоТЭС в Серро-Прието работает с 1973 г., ее мощность составляет 75 МВт. С апреля 1973 г. до марта 1974 г. здесь было выработано на двух имеющихся установках ~ 7900 МВт. К августу 1977 г. мощность электростанции должна была удвоиться и составить 140 МВт, а к июню 1982 г. достигнуть ~ 400 МВт.

Месторождение в Серро-Прието занимает около 10 км². Скважины пробурены группами, причем на каждую скважину приходится

площадь ~ 4 га. Всего пробурено 32 скважины, из которых лишь две дали холодную жидкость. На территории месторождения можно разместить 250 скважин, и общая мощность ГеоТЭС достигнет тогда 1500 МВт. Но такую мощность можно будет обеспечить только при условии сохранения средней производительности пара из одной скважины, равной 54 т/ч. Вода, получаемая из продуктивных скважин, содержит $\sim 2,5\%$ солей. Что же касается возможности извлечения ценных солей, то следует отметить, что солесодержание здесь на порядок ниже, чем в водах месторождения Солтон-Си и в долине Импириал-Валли (США).

В работе [6] сообщается о том, что в Серро-Прието проведено исследование коррозии и приведены рекомендации по выбору материалов для турбины. В частности, для работы при низких температурах рекомендуется покрывать углеродистую сталь эпоксидными компаундами. Алюминий и медь не рекомендуются в качестве материалов для конденсатора. Для этой цели подходят такие высокопрочные материалы, как титан.

Скважина, пробуренная недавно на расстоянии 1,5 км северо-западнее эксплуатируемого месторождения на глубину 2000 м, имела на забое температуру 344°C , давление на устье 7,55 МПа и производительность 133 т/ч, что достаточно для производства 5 МВт электрической мощности. Полученные результаты говорят о том, что размеры месторождения в Серро-Прието значительно превышают известные в настоящее время.

САЛЬВАДОР

На месторождении в Ауачапане, описанном в работе [7], итальянская фирма "ЛЦ-Электроконсульт" в 1975 и 1976 гг. ввела в действие две ГеоТЭС мощностью по 30 МВт каждая, имеющих конденсационные турбины. Особенности производства, опыт работы и перспективы подробно описаны в работе [47]. Из четырех пробуренных здесь скважин при температуре на забое $\sim 232^{\circ}\text{C}$ получают ~ 1100 т/ч смеси пара и жидкости с теплосодержанием ~ 1070 кДж/кг. После отделения в циклонных сепараторах, расположенных вблизи устья скважин, получают ~ 140 т/ч пара при среднем давлении 0,7 МПа. Вода сильно минерализована, но количество неконденсирующихся газов очень мало (0,2% веса пара при 0,7 МПа). Искользованные воды в основном закачивают снова в месторождение. Сооружается также специальный канал длиной 60 км для сброса части использованных

вод в океан. За первые два с половиной года эксплуатации наблюдалось некоторое снижение давления и температуры, которое, однако, не сказалось на работе ГеоТЭС.

Предполагается бурение более глубоких скважин для сооружения к концу 1979 г. еще одной ГеоТЭС мощностью 35 МВт, которая будет работать на паре среднего давления и паре низкого давления, получаемого при вскипании воды после сепараторов. Начиная с 1979 г. здесь предполагается производить всего более 90 МВт электрической мощности.

Литература

1. Smith M.C., *Geothermal Energy*, LA-5289-MS, Los Alamos Scientific Laboratory, University of California, May, 1973.
2. Hot Brine Converted to Electricity in 10 MW-Test Facility, *Elec. Rev.*, No. 13 (1976).
3. Rowley J.C., *Geothermal Energy Development*, *Phys. Today*, No. 1 (1977).
4. Otte C., The Potential for Geothermal Steam, *Chem. Eng. Progr.*, 72, No. 7 (1976).
5. Peck D.L. et al., *Assessment of Geothermal Energy Resources*, Federal Council of Science and Technology, PB 224, 882, June 1972.
6. *Proceeding Second United Nations Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources*, San Francisco, California, USA, 20-29 May 1975, vv. 1-3.
7. *Геотермальная энергия*, изд-во "Мир", М., 1975.
8. Muffler L.J., White D.E., *Geothermal Energy*, *The Science Teacher*, 39, 3 (1972).
9. Goguel J. Quelques problèmes posés à la recherche technique par l'exploitation d'énergie géothermique *Rech. techn. assoc. nat. techn.*, No. 8 (1974).
10. Till L., Wie umweltfreundlich ist ein geothermisches Kraftwerk, *Wissenschaft und Fortschritt*, 26, No. 10 (1976).
11. A Feasibility Study of a Plowshare Geothermal Power Plant, PNE-1550, April 1971.
12. Geysers Power Expansion Planned, *Energy Int.*, 14, No. 1 (1977).
13. Broomster C.H., Engel R.L., The Potential National Benefits of Geothermal Electrical Energy Production from Hydrothermal Resources in the West, 11-th Intersoc. Energy Convers. Eng. Conf. Proc., State Line, vol. 1, N.Y., Nov. 1976.
14. Dutcher J.L., Moir L.H., Geothermal Steam Pricing at the Geysers Lake and Sonoma Counties, California, 11-th Intersoc. Energy Convers. Eng. Conf. Proc., State Line, N.Y., vol. 1, pp. 1-76, Nov. 1976.

15. Bowen R.G., Groh E.A., Geothermal-Earth's Primordial Energy, *Technology Review*, 42-48 (Oct.-Nov. 1971).
16. Maslan F., Gordon T.J., Geothermal Energy as a Resource in a Hydrogen Energy Economy, *Hydrogen Energy*, Pt A, N.Y. - London, pp. 57-85, 1975.
17. Exploration and Exploitation of Geothermal Resources in Arid and Semiarid Lands, PB 218, 830, Office of Arid Land Studies, University of Arizona, 1973.
18. McNitt J.R., Exploration and Development of Geothermal Power in California, California, Division of Mines and Geology, Special Report, p. 75, 1965.
19. Summers W.K., Ross S.H., Geothermics in North America: Present and Future, *Earth Science Bulletin*, 4, No. 1, 7-22 (1971).
20. Miller L.D., Steaming and Warm Ground in Yellowstone National Park: Their Location, Geophysics, Vegetation and Mapping with Aerial Multispectral Imagery, Ph. D. Dissertation, University of Michigan, 1968.
21. Moxham R.M., Aerial Infrared Surveys at the Geysers Geothermal Steam Field, US Geological Survey, Professional Paper 650-c, pp. 106-122, 1969.
22. Moxham R.M., Thermal Features at Volcanoes in the Cascade Range as Observed by Aerial Infrared Studies, *Bulletin Volcanologique*, 34, 77-106 (1970).
23. Hase H., Surface Heat-Flow Studies for Remote Sensing of Geothermal Resources, *Japanese Society of Photogrammetry Journal*, 10, No. 3, 9-17 (1971).
24. Kerr del Grande N., An Advanced Airborne Infrared Method for Evaluating Geothermal Resources, Proc. 2nd UN Symp. on Dev. and Use of Geo. Res., San Francisco, vol. 2, pp. 947-953, 1975.
25. United Nations Conference on New Sources of Energy: Solar Energy, Wind Power and Geothermal Energy, Rome, 21-31 August 1961, vol. 2-3; Geothermal Energy, vol. 1-2, United Nations, 1964.
26. White D.E., Muffler L.J.P., Truesdell A.H., Vapor-Dominated Hydrothermal Systems Compared Hot-Water Systems, *Economic Geology*, 66, No. 1, 75-97 (1971).
27. Combs J., Witt M., Telluric Mapping, Telluric Profiling and Selfpotential Surveys of the Dunes Geothermal Anomaly Imperial Valley, Proc. 2nd UN Symp. on Dev. and Use of Geo. Res., San Francisco, vol. 2, pp. 917-928, 1975.
28. New Zealand Geothermal Station on Line by 1981, *Elec. Rev. (Gr. Brit.)*, 199, No. 18 (1976).
29. Whiteford P.C., Studies of the Propagation and Source Location of Geothermal Seismic Noise, Proc. 2nd UN Symp. on Dev. and Use of Geo. Res., San Francisco, vol. 2, pp. 1263-1271, 1975.
30. Crosby J.W., Geothermal Exploration, Northwest Conference on Geothermal Power, 1st, Olympia, Washington, 1971.
31. Criscom A., Muffler L.J.P., Aeromagnetic Map and Interpretation of the Salton Sea Geothermal Area, California, US Geological Survey, Geophysical Investigations Map GP 754, 1971.
32. Waring G.A., Thermal Springs of the United States and Other Countries of the World - a Summary; US Geol. Survey Prof. Paper 492, 1965.
33. Barbier E., Fanelli M., Relationships as Shown in ERTS Satellite Images between Main Fractures and Geothermal Manifestations in Italy, Proc. 2nd UN Symp. on Dev. and Use of Geo. Res., San Francisco, USA, vol. 2, pp. 8883-8888, 1975.
34. Hottel H., A Partial Survey of Unconventional Energy Sources, *S. Afr. Mech. Eng.*, 25, No. 11 (1975).
35. White D.E., Geothermal Energy, *US Geol. Survey Circ.*, 519 (1965).
36. Kilkenny J.E., Geothermal Energy, Pt II, General Appraisal of the Earth's Prospective Energy, An Initial Appraisal by the New Energy Forms Task Group, 1971-1985, National Petroleum Council, pp. 27-35, 1972.
37. Rex R.W., Testimony before Senat Interior and Insular Affairs Committee on Fuels and Energy Policy, Congressional Record, June 15, 1972.
38. McKelvey V.E., Mineral Resource Estimates and Public Policy, *American Scientist*, 60, No. 1 (1972).
39. Schurr S.H., Netschert, Energy in the American Economy 1850-1975, An Economic Study of the History and Prospects, Johns Hopkins Press, Baltimore, 1960.
40. Grossling B.F., An Appraisal of the Prospects of Geothermal Energy in the United States, Pt 1, An Initial Appraisal by the New Energy Forms Task Group 1971-1985, National Petroleum Council, pp. 15-26, 1972.
41. Gault J., Hall J.W., Wilson J.S., Michael H., Shepherd B.P., Underhill G., Castellon L., Preliminary Analysis of Electric Generation Utilizing Geopressured Geothermal Fluid, 11-th Intersoc. Energy Convers. Eng. Conf. Proc., State Line, N.Y., vol. 1, Nov. 1976.
42. US Geothermal Resources - no Panacea, but Potential for Additional Energy, *Eng. and Mining J.*, 176, No. 10 (1975).
43. Burnham J.B., Stewart D.H., Foreign and Domestic Discussions on National Geothermal Power and Potential Use of Plowshare to Stimulate These Natural Systems, BNWL-B-110, July 1971.
44. Ямасиро Йосуй, ГеотЭС Японии, *Дэки гэмба гидзюцу*, 15, № 173 (1976).
45. Dan F.J., Hersam D.E., Kho S.K., Krumland L.R., Development of a Typical Generating Unit at the Geysers Geothermal Project - a Case Study, Proceeding of Second UN Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, vol. 3, pp. 1949-1958, 1975.

46. Goldsmith M., Rolph E., Geothermal Resources in California—Potentials and Problems, PB 212, 753, May 1972.
47. Baldo L., Cozzini M., Girelli M., Centrale Geotermica da 90 MW di Ahuachapán, El Salvador, C.A. Considerazioni Tecnico-Economiche ed Esperienze di Esercizio, Simposio Sovietico-Italiano sui Problemi Scientifici nel Campo della Produzione ed Distribuzione dell' Energia, ELC-Electroconsult, Milano, Italia, Settembre-Ottobre 1977.

2

СУХИЕ ГЕОТЕРМАЛЬНЫЕ
МЕСТОРОЖДЕНИЯ

При написании данной главы использованы материалы отчета [1], подготовленного для отдела по ядерным исследованиям Министерства обороны США.

Геотермальная энергия, являясь чистым и повсеместно распространенным видом энергии, представляется перспективной для широкого использования. Однако, как показано в работе [2], повсеместное использование геотермальной энергии связано с тремя стадиями ее разработки.

В настоящее время США находятся на первой стадии, когда извлечение геотермальной энергии производится лишь из источников с поверхностными термальными проявлениями. На второй стадии будут осваиваться геотермальные ресурсы в местах с аномальными геотермическими градиентами, а на третьей — сооружаться более глубокие скважины в местах с нормальными геотермическими градиентами ($\sim 3^\circ\text{C}/100\text{ м}$), имеющими место почти всюду на поверхности земли.

На третьей стадии будет освоен потенциальный источник надежного и независимого снабжения чистой энергией. Но прежде чем будут созданы условия для широкого использования геотермальной энергии, необходимо решить целый ряд проблем научного, технологического, инженерного и экономического плана. До сих пор отсутствует научное объяснение природы и поведения горных пород при давлениях и температурах, имеющих место на больших глубинах. В ходе дальнейших исследований и разработок должна быть также лучше понята проблема материалов и изучены основные процессы переноса тепла, что необходимо для продолжительной эксплуатации таких геотермальных систем.

Инженерные разработки, начиная с бурения геотермальных скважин и кончая созданием подземных систем преобразования энергии и обеспечением переноса тепла к поверхности циркулирующим тепло-

носителем, сами по себе ставят задачи как прикладного, так и теоретического плана. Критическим фактором выполнения программы исследований и разработок на третьей стадии освоения геотермальных ресурсов является создание практических средств для бурения скважин в сухих горячих породах на глубины, необходимые для проведения дальнейших научных исследований и технологических разработок. Лучшим методом бурения таких скважин является роторное бурение, с успехом применяемое при разведке и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений. Однако геологические факторы геотермальных месторождений существенно отличаются от геологических факторов нефтяных и газовых месторождений. Чтобы оценить возможности роторного бурения и устранить препятствия на пути его применения в геотермальных системах, требуется изучение особенностей последних и проведение соответствующего анализа. Значительное место в отчете [1] было уделено этим вопросам.

Основные выводы, касающиеся использования тепла сухих горячих пород при аномально высоких геотермических градиентах, следующие [1].

1. Методы роторного бурения применимы при бурении скважин в сухих горячих породах на глубины ~ 6 км в местах с геотермическими градиентами, в несколько раз превышающими нормальные. При таких градиентах на указанной глубине в месторождениях достигается температура $260\text{--}315^\circ\text{C}$.

2. При допущении о гидравлическом способе создания трещин в породе или о каком-то другом эквивалентном способе подземного преобразования энергии ГеоТЭС мощностью 100 МВт (или менее) оказываются экономически более выгодными по сравнению с атомными электростанциями и могут конкурировать с обычными тепловыми электростанциями при стоимости жидкого топлива 3,2 цент/л. Указанный способ втрое удешевляет получение энергии из сухих горячих пород, снижает число требуемых скважин, способствует расширению системы передачи энергии и обеспечивает долгий срок службы скважин (до 20 лет).

Основные выводы, касающиеся использования тепла сухих горячих пород с обычными градиентами температуры ($\sim 3^\circ\text{C}/100$ м), следующие.

1. Технология роторного бурения должна быть усовершенствована и приспособлена для бурения геотермальных скважин глубиной 10–12 км при температурах, достигаю-

щих 315°C . Существует известный риск, связанный с надежностью материалов, а также с работой колонны буровых труб, системы каротажа и других подсистем, составляющих систему роторного бурения.

2. Даже при указанном выше допущении о подземном преобразовании энергии с помощью гидравлического разрыва ни предполагаемые цены, ни риск создания геотермальных систем в этом случае (т. е. при роторном бурении на глубины 10–12 км) не оказываются оправданными, а ГеоТЭС конкурентоспособными с электростанциями других типов. Лишь в случае, если методы роторного бурения в нефтяной промышленности будут усовершенствованы и станут применяться для скважин глубиной более 9 км, этот вывод можно будет пересмотреть.

3. Другим, единственно приемлемым способом освоения геотермальной энергии при нормальных геотермических градиентах является бурение большого числа менее глубоких скважин и использование цикла с вторичным теплоносителем. В частности, предложено бурить 5 пар скважин на глубины 5,5–6,0 км, где температура составляет $\sim 170^\circ\text{C}$. При этом вполне возможно использовать роторное бурение, хотя число требуемых скважин велико, а начальные капиталовложения высоки. При использовании метода преобразования энергии с вторичным носителем срок эксплуатации месторождения сокращается с 20 до 3–4 лет. Это делает такой способ получения энергии неконкурентоспособным. Так, при сроке эксплуатации месторождения 20 лет стоимость энергии в такой системе составит $15,5 \cdot 10^{-3}$ долл./кВт·ч, а при 3–5 годах $(21,5\text{--}28) \cdot 10^{-3}$ долл./кВт·ч.

Итак, получение энергии из сухих горячих пород с помощью скважин глубиной 10–12 км имеет следующие преимущества: извлечение чистой энергии; самостоятельный и независимый источник энергии; отсутствие проблем его возобновления или трудностей эксплуатации; конкурентоспособность ГеоТЭС мощностью до ~ 100 МВт со станциями других типов; применимость методов роторного бурения при их совершенствовании и оправдание идеи создания подземной системы преобразования энергии.

Обычные методы бурения СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ

Технические проблемы при обычном глубинном бурении достаточно сложны. Проходка известной или неизвестной последовательности пластов пород колонной бурильных труб должна производиться с помощью хорошо отлаженной системы бурения, в которой нагрузки достигают нескольких сотен тысяч килограммов на крюке, а мощности насосов для спуско-подъемных операций — нескольких тысяч лошадиных сил.

Обычное бурение предусматривает: создание уравновешивающего давления и вынос разбуренного грунта с помощью бурового раствора; передачу мощности и подачу жидкости с помощью колонн бурильных труб; поддержание скважины открытой при различных давлениях с помощью колонны обсадных труб и, наконец, каротаж и завершение скважин, включая их цементирование и перфорирование, при самых различных давлениях, температурах, химических и механических условиях.

Большинство из 30 тыс. скважин, которые ежегодно бурятся в США, имеют сходные характеристики. Это касается диаметра и глубины, времени бурения и стоимости. Поэтому основные узлы, используемые при бурении, могут быть стандартными. Почти все скважины при обычном бурении проходятся в осадочных породах. Однако из-за различных условий (давления, прочности породы, пористости и т.д.) требуется крепление скважин обсадными трубами с различной прочностью. Кроме того, диаметры колонн обсадных труб уменьшаются с глубиной, так что эти колонны должны состоять из точно подобранных по размеру обсадных труб. В результате скважины при бурении получаются конусообразными, и в случае сложной обсадки возможно значительное снижение их диаметра. Если же диаметр на устье скважины недостаточно велик, то это может ограничить ее конечную глубину.

Проектирование скважин становится важной частью всего процесса бурения. Оно прежде всего основано на ранее накопленном опыте. Использование известных расчетных данных и отработанных программ расчета на ЭВМ, как, например, программы расчета оптимального бурения "Амоко", позволяет получать весь набор параметров для бурения и значительно экономит время и средства. В ходе бурения следует проводить расчеты стоимости 1 ч работ и 1 погонного метра проходки ствола скважины и проверять выполнение пла-

на работ и отклонения от графика путем сопоставления с предварительно полученными данными. Программы расчета на ЭВМ и опыт, на основании которого они составлены, должны определять скорости продвижения колонны труб и давления, которые будут действовать на обсадку и стенки скважины.

Основным методом бурения является роторное бурение, для которого требуется дополнительный бурильный инструмент (головка) на конце вращающейся колонны бурильных труб. Эту головку необходимо периодически менять, для чего приходится извлекать и вновь опускать всю колонну бурильных труб. При больших глубинах на извлечение, замену буровой головки и на спуск бурильных труб тратится значительное время. Например, при глубине 3000 м этот процесс занимает 10 ч, а при глубине 9100 м — 24 ч. По существу это время является непродуктивным.

Для снижения затрат (времени и средств), связанных с заменой буровой головки, были разработаны методы, позволяющие сократить число этих операций или вообще избавиться от них. Были проведены исследования материалов и конструкций головки, а также методов смены головки через бурильную трубу. Другой вариант заключается во вращении буровой головки под давлением бурового раствора на конце неподвижной колонны бурильных труб. Однако эти предложения не нашли в США значительного применения, особенно по сравнению с надежным стандартным методом роторного бурения, при котором используются алмазные или изготовленные из твердых сплавов буровые головки.

В 1971 г. в мире было добыто такое количество газа и нефти, которое обеспечило выработку $\sim 168 \cdot 10^{15}$ Дж энергии, из них $56 \cdot 10^{15}$ Дж для экономики США. Нефть и газ обеспечили покрытие $\sim 3/4$ общих потребностей США в энергии. Остальная часть была получена за счет угля, атомных и гидроэлектростанций.

Большая часть нефти и газа получена с глубин 3–6 км, однако ведутся эксперименты, поисковые работы и на глубинах более 6 км. Пробурено несколько скважин глубиной более 9 км. Причем эти опыты проводятся без каких-либо значительных изменений методов бурения. Следует тем не менее отметить, что самое глубокое бурение было выполнено в сравнительно благоприятных геологических условиях — в осадочных образованиях (долина Амадарко, шт. Оклахома).

С технической точки зрения, бурение в породах вулканического происхождения является более легким, чем в осадочных породах,

поскольку требования к обсадке, буровому раствору (для противодействия пластовому давлению) менее жестки, хотя скорости бурения значительно ниже. Однако нефть и газ редко находят в вулканических породах, и бурение в этих формациях обычно производится при поисках месторождений минеральных ископаемых.

К моменту написания данной книги бурение геотермальных скважин на глубины более 3 км не проводилось. При пневматическом бурении имеет место сильный износ бурильного оборудования, а температура более 315°C представляет непреодолимые трудности при каротаже, цементировании и завершении скважин. Столь высокие температуры очень редко встречаются при бурении в осадочных породах, но при бурении геотермальных скважин они становятся обычными. Причем, геотермические градиенты в районах, где проводится бурение, весьма различны. Геотермальное бурение ограничено районами с высокими или очень высокими градиентами температуры, что находит отражение в числе скважин: до 1973 г. в мире было пробурено 3000 геотермальных скважин и несколько миллионов нефтяных и газовых скважин (по 100 000 скважин в год бурилось только в течение последних 20 лет).

НАПРАВЛЕНИЯ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Обычные методы бурения предназначены в основном для прохождения осадочных пород при поисках нефти и газа. Сравнительно недавно был разработан метод бурения на несколько большие глубины без значительных изменений технологии бурения. Однако оптимальный интервал при роторном бурении приходится на глубины 6–7,5 км преимущественно в осадочных породах. Из-за экспоненциального роста стоимости бурения с ростом глубины для глубинных геотермальных систем могут потребоваться другие более экономичные способы прохождения породы. Поэтому требуются дальнейший анализ сложной системы "человек — машина — массив литосферы" и проведение дальнейших исследований в области новой техники и механических процессов.

Что касается бурения геотермальных скважин, то наиболее дешевым способом освоения геотермальной энергии является сооружение неглубоких скважин в районах с высоким термическим градиентом, которые встречаются относительно редко. Для извлечения геотермальной энергии требуется сооружение скважин большего диаметра, чем при добыче нефти и газа. Минимальный внутренний диаметр скважины, обеспечивающей необходимый расход пара для паро-

вой турбины, составляет 0,3–0,6 м. Кроме того, для размещения на глубине теплообменников также могут потребоваться большие диаметры скважин.

Глубокое роторное бурение СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ

Имеется лишь несколько скважин, пробуренных на глубину более 7,5 км. Из-за технологических и геологических трудностей, стоимость бурения возрастает экспоненциально с ростом глубины. Поэтому вопрос о целесообразности использования роторного бурения для создания глубоких геотермальных скважин не имеет однозначного ответа. Все проблемы и ограничения, касающиеся глубокого бурения, рассматриваются в разделе Технологические трудности и ограничения. Здесь описываются общее состояние вопроса и основные технические проблемы и ограничения, присущие современным методам сооружения скважин, их испытания, завершения и каротажа, а также подробно рассматривается оборудование, используемое при глубоком бурении на нефтяных и газовых месторождениях. Приводятся также данные о многих скважинах в различных геологических условиях: в штатах Калифорния и Оклахома, на юге штатов Луизиана и Техас, в штатах Западная Виргиния и Вайоминг.

Условия на глубине при глубоком бурении часто мало известны. Сейсмические записи о породах на глубинах более 7,5 км более слабые и менее четкие, чем на меньших глубинах. Сверхглубокое бурение в настоящее время проводится в основном в осадочных образованиях, основные структурные характеристики которых заранее могут быть предсказаны и определены.

При бурении глубоких скважин для нефти или газа скважина по всей глубине должна иметь достаточно большой диаметр, позволяющий установить колонну обсадных труб. Обычно для таких скважин требуется несколько последовательно расположенных колонн обсадных труб, которые в некоторых случаях могут настолько уменьшить диаметр скважины, что ее использование станет нецелесообразным. Эти и другие ограничения и трудности могут быть проиллюстрированы на следующих примерах.

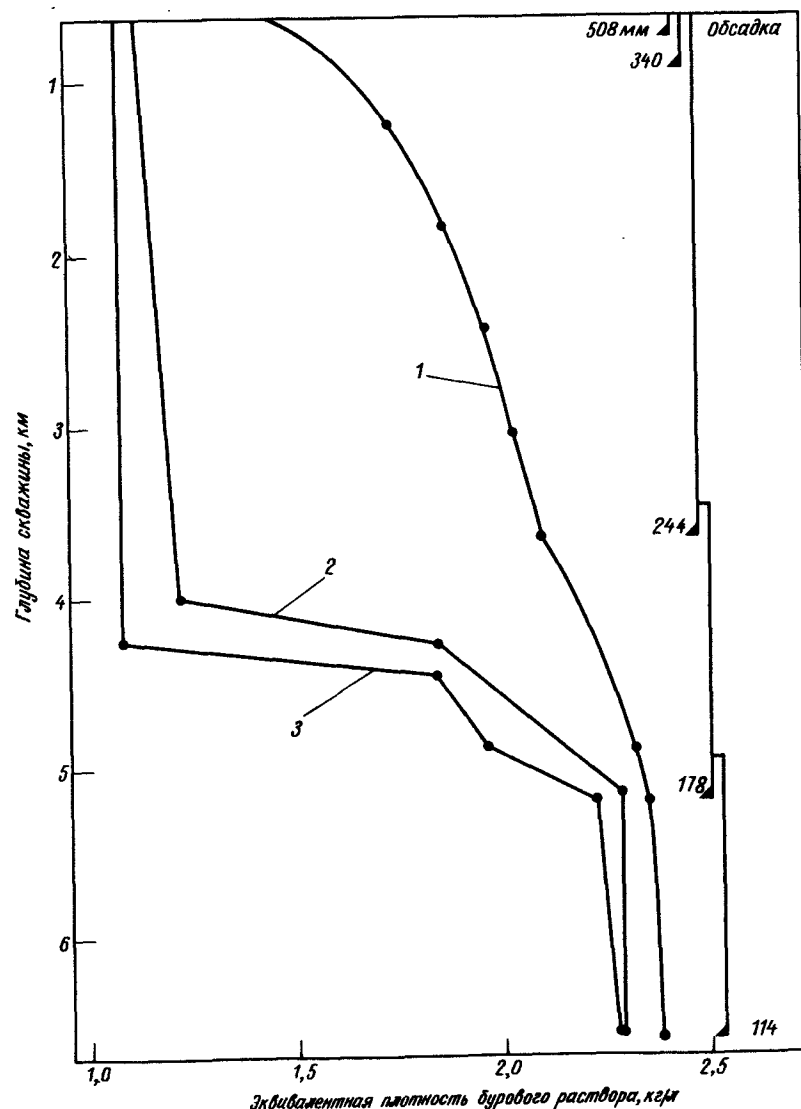
Скважина 31-10X глубиной 6600 м, Теннеко (шт. Калифорния). Фирма "Грейт бэзинс петролеум", выполняющая работы по заказу ряда других фирм, пробурила эту самую глубокую скважину в шт. Калифорния. В 1973 г. проводилось бурение еще двух глубоких скважин, глубина которых также должна была превысить 6,6 км. Все три

скважины расположены в области Бейкерсфилд (в южной части долины реки Сан-Хуакин). Недра здесь слагают осадочные образования, которые испытывают высокие давления и содержат непрочные породы, требующие установки колонн обсадных труб. Осадочные породы состоят обычно из слоев песчаника, аргиллита, известняка и их сочетаний. Поры, образовавшиеся в этих породах, могут занимать 10–30 объемн.%. Жидкость в порах находится под давлением, а так как поры соединены друг с другом, то жидкость под действием давления может перемещаться. При обычных условиях жидкость в порах находится под давлением, равным давлению столба пресной или соленой воды на такой же глубине.

Например, на глубине ~ 3 км нормальные давления пресной и соленой воды составляют соответственно 29,9 и 32,1 МПа. Известно, однако, что некоторые формации имеют аномальные градиенты давления по глубине, составляющие ~ 27 кПа/м, что соответствует давлению 166 МПа на глубине 6,1 км. На нефтяных месторождениях давления обычно выражаются эквивалентным напором столба бурового раствора с определенной плотностью, выраженной в кг/л. Так, на глубине 9,15 км, где жидкость в порах находится под давлением 172 МПа, потребуется столб бурового раствора плотностью 1,92 кг/л высотой 9,15 км, чтобы компенсировать это давление. Скважины в породах, испытывающих столь мощные давления, следует закреплять обсадными трубами и цементировать, прежде чем продолжать бурение.

Другим фактором, заставляющим закреплять скважины обсадными трубами, является образование в породах трещин. Если плотность бурового раствора очень велика, то в некоторых породах с низким поровым давлением вокруг скважины начинают возникать трещины. При этом буровой раствор затекает в трещины и его циркуляция нарушается. В зонах с прекратившейся циркуляцией необходимы обсадка и цементирование.

Суть рассмотренных вопросов поясняется на примере самой глубокой скважины, пробуренной в шт. Калифорния (фиг. 2.1). На графике приведены условия, имевшие место во время бурения скважины. Левая кривая характеризует изменения по глубине пластового давления, выраженного в эквивалентных плотностях бурового раствора. Фактическая плотность использованного бурового раствора представлена средней кривой. Кривая плотности раствора всегда выше кривой пластового давления на той же глубине. В противном случае скважина может выйти из-под контроля и начнется выброс. На фигуре также представлена кривая давления, вызывающего гидроразрыв



Фиг. 2.1. Изменение давления в самой глубокой в Калифорнии скважине [1].
1 — давление, вызывающее гидроразрыв в породах формации; 2 — плотность использованного бурового раствора; 3 — пластовое давление.

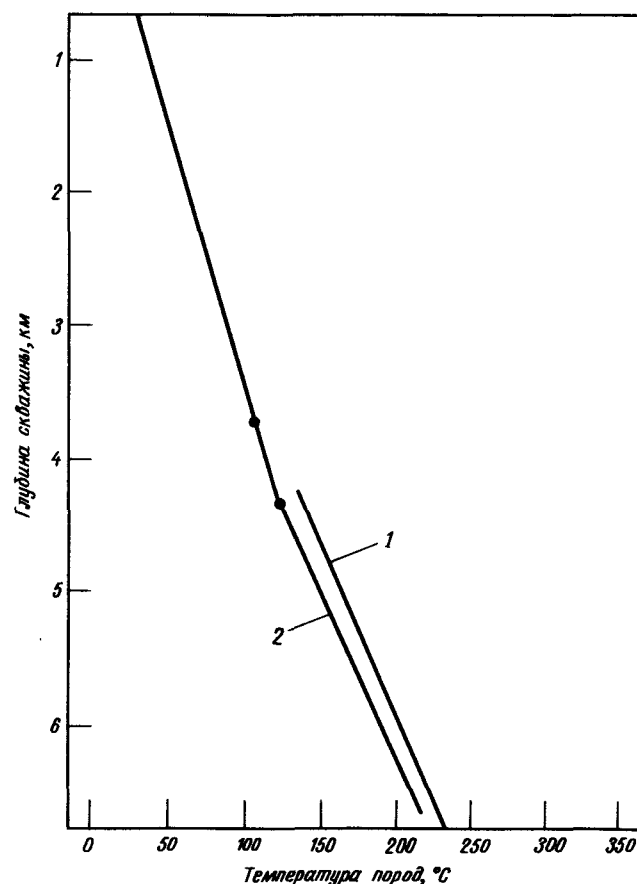
в породах формации. Если на какой-то глубине напор бурового раствора превысит величину давления гидроразрыва, то произойдет образование трещин и циркуляция нарушится.

В рассматриваемой скважине были установлены колонны обсадных труб и проведено цементирование. Первоначально предполагалось, что скважина будет глубиной 3,66 – 4,27 км. При глубине 3,66 км была произведена обсадка трубами диаметром 244 мм, что было связано с нестабильными условиями в скважине, при которых бурильные трубы почти заклинились. После обсадки трубами с таким диаметром бурение было продолжено на большую глубину. На глубине 5,18 км вес бурового раствора, необходимый для предотвращения выброса из скважины, стал столь большим, что в скважине прекратилась циркуляция и произошел прихват бурильной трубы. Указанные трудности были разрешены путем обсадки скважины трубами диаметром 178 мм, после чего бурение было продолжено. До глубины 6,6 км скважина бурилась без обсадки. Затем скважина была обсажена колонной труб диаметром 114 мм. В конце концов обсадка настолько уменьшила диаметр скважины, что бурение на большую глубину стало невозможным.

Еще одной проблемой, возникающей при таких мощных давлениях, является смятие обсадной колонны в отсутствие бурового раствора. Из фиг. 2.1 видно, что давление на полной глубине эквивалентно напору 6,6 км бурового раствора плотностью 2,21 кг/л или равно примерно 142 МПа. Если при диаметре труб 114 мм скважина не будет заполнена раствором, на трубы снаружи будет действовать давление 137 МПа, достаточное для смятия всех известных обсадных труб такого диаметра. Лишь при меньших внутренних диаметрах обсадных труб смятия можно избежать.

Высокие температуры на больших глубинах могут вызвать трудности при использовании буровых растворов и цемента и выполнении каротажа скважины. На фиг. 2.2 показано изменение температуры по глубине рассматриваемой скважины. Температуры пород обычно представляют градиентами температуры в градусах Цельсия на 100 м глубины. На фиг. 2.2 градиент температуры на глубине 0 – 4,27 км составляет 2,4°C/100 м, а на глубине 4,27 – 6,6 км – 3,8°C/100 м глубины. Если продлить график на глубины более 15 000 м, то можно ожидать достижения температур более 535°C. Естественно, что применение существующих бурильных растворов, цемента и инструмента для каротажа при таких температурах невозможно.

Скважина № 1 глубиной 8400 м, Исли (шт. Оклахома). Эта скважина была пробурена фирмой "Эль-пазо нейчрел гэз" и расположена в нескольких километрах от самой глубокой скважины мира. Данные

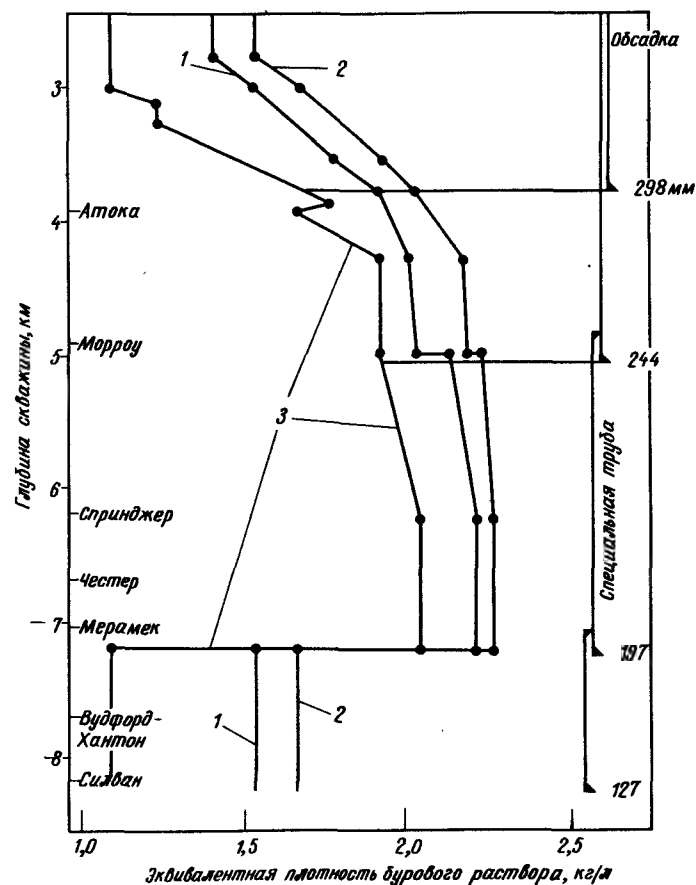


Фиг. 2.2. Изменение температуры по глубине скважины в районе Бейкерсфилда (шт. Калифорния) [1].

1 — рассчитанная температура; 2 — измеренная температура.

по геологии, давлению и температуре для обеих скважин совпадают (фиг. 2.3).

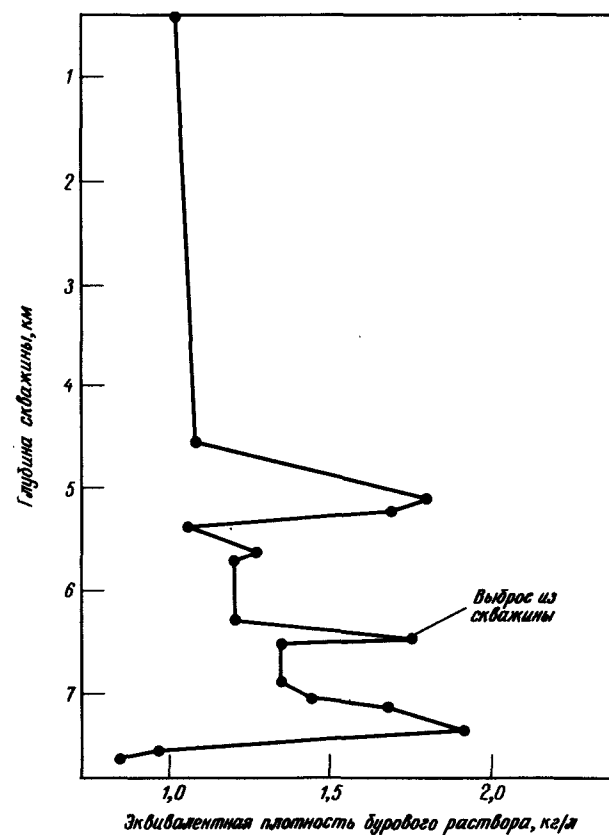
Кровли важнейших напластований указаны в левой части графика. Поровые давления представлены левой кривой, следующие две кривые показывают пределы давлений, приводящих к образованию трещин гидроразрыва. Как и в случае фиг. 2.1, кривая изменения плотности



Фиг. 2.3. Давление в скважине № 1 в Исли (графство Уошито, шт. Оклахома) [1].

1 — минимальное давление, вызывающее гидроразрыв; 2 — максимальное давление вызывающее гидроразрыва; 3 — расчетное поровое давление.

бурового раствора должна быть всегда несколько выше кривой порового давления, но меньше давлений, приводящих к образованию трещин гидроразрыва. Поэтому потребовались все колонны обсадных труб, показанные на фиг. 2.3. На глубине 1,22 км была также установлена колонна обсадных труб диаметром 406 мм.



Фиг. 2.4. Плотность бурового раствора в скважине 1-1, пробуренной в Гловер-Хефнер-Кеннеди-Грине (графство Бекхем, шт. Оклахома) [1].

Недалеко от рассмотренной скважины в Гловер-Хефнер-Кеннеди-Грин ранее была пробурена скважина 1-1. На фиг. 2.4 приведены данные по весу бурового раствора, использованного в этой скважине. Величина порового давления проверена по кратковременным выбросам бурового раствора на глубине чуть ниже 6,4 км.

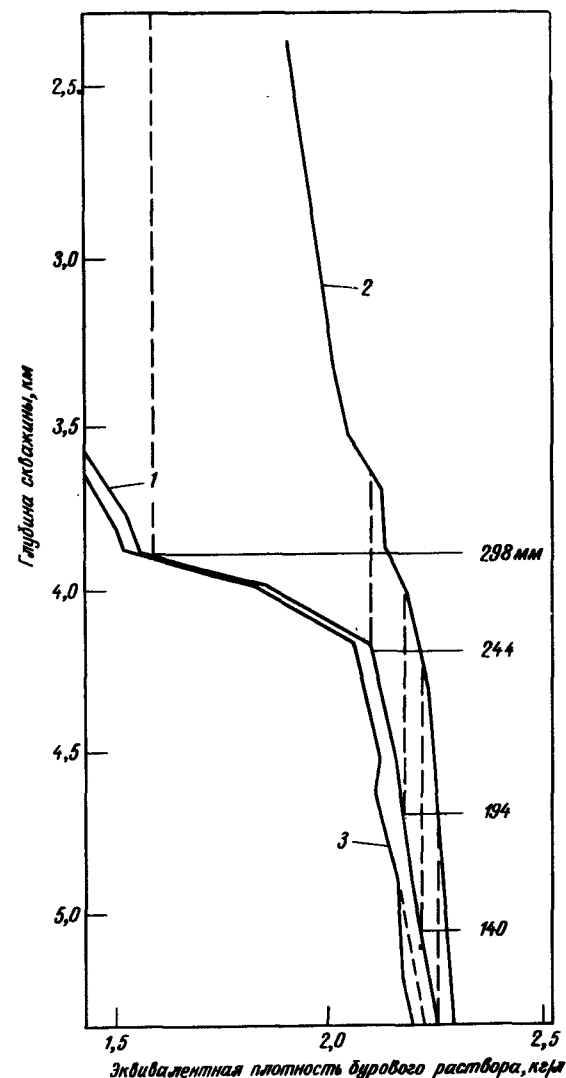
Градиенты температуры в этом районе не очень высоки. Тем не менее температура в скважине № 1 в Бадене на глубине 9,14 км со-

ставила 260°C . Скважина была пробурена фирмой "Лоун стар газ продьюсинг". Фирма оказалась не в состоянии провести измерения по всему разрезу скважины ниже 9,14 км из-за высоких температур на этой глубине.

Скважина Феликс-Бак № 1 глубиной 5340 м, Лафайетт-Парис (шт. Луизиана). Скважина пробурена фирмой "Доу кемикл". Глубокое бурение в этом районе имеет, помимо общих, еще ряд дополнительных трудностей, поскольку отложения здесь сравнительно молодые и с увеличением глубины становятся очень пластичными и ползучими. Разрыв породы связан именно с пластической или вязкой ее структурой, а не с хрупкостью, как в случае твердой породы.

Поровое давление становится здесь иногда столь же высоким, как и литостатическое давление, которое создается весом всех покрывающих отложений и весом содержащихся в этих отложениях флюидов. Например, вблизи поверхности плотность отложений составляет $\sim 2 \text{ г/см}^3$, а на глубине 6,1 км возрастает до $2,6 \text{ г/см}^3$. При таких условиях литостатическое давление на глубине 5,34 км равно $\sim 119 \text{ МПа}$. Поровое давление эквивалентно весу столба бурового раствора с плотностью $2,22 \text{ кг/л}$ (фиг. 2.5). Таким образом, поровое давление на глубине 5,34 км составляет $\sim 116 \text{ МПа}$ и лишь на 3 МПа меньше литостатического давления на той же глубине. А давление, приводящее к образованию трещин на этой глубине, равно $\sim 119 \text{ МПа}$, т. е. равно литостатическому давлению. Основная проблема, которую необходимо решать при таких давлениях, уже рассмотрена выше и заключается в обеспечении такой плотности бурового раствора, которая была бы лишь немного большей порового давления, эквивалентного плотности бурового раствора $2,22 \text{ кг/л}$, чтобы исключить возможность выброса из скважины. Однако в тех случаях, когда насосы для бурового раствора включаются во время бурения, давление циркулирующей жидкости на забое скважины может стать существенно большим, чем давление гидроразрыва. В этом случае могут образоваться трещины, нарушится циркуляция и произойдет выброс.

Чтобы исключить такую ситуацию, требуется несколько колонн обсадных труб (фиг. 2.5). Например, плотность столба бурового раствора на глубине 5,07 км составляет $2,19 \text{ кг/л}$. А давление в порах при диаметре обсадной трубы 244 мм эквивалентно плотности $2,26 \text{ кг/л}$. Поэтому, когда буровой раствор с плотностью $2,22 \text{ кг/л}$ циркулирует вверх по обсадной трубе диаметром 244 мм, давление,



Фиг. 2.5. Изменение давления по глубине скважины в Южной Луизиане [1].
1 — регистрируемая плотность бурового раствора; 2 — давление, вызывающее гидроразрыв; 3 — расчетное поровое давление.

создаваемое этим раствором, близко к давлению гидроразрыва на этой глубине. Если обсадная труба диаметром 244 мм не была бы установлена и зацементирована, то где-то на глубине этой обсадки образовались бы трещины и произошло нарушение циркуляции. По той же самой причине необходима установка колонн обсадных труб на большие глубины.

Бурение на глубины более 5,5–6,1 км в рассматриваемом районе обычными методами становится невозможным. Поровое давление и литостатическое давление становятся одинаковыми. Особое внимание при этом следует уделять плотности бурового раствора. Во многих случаях плотность бурового раствора становится настолько критической, что при остановке насосов возникает опасность выброса, а при включении насосов и использовании того же раствора происходит нарушение циркуляции.

Температуры в исследуемом районе достаточно высоки, но поскольку бурение на глубины порядка 9 км здесь не проводилось, то очень высокие температуры пока не зарегистрированы. Тем не менее давления и температуры здесь таковы, что породы становятся очень пластичными, и если в скважине или в обсадной трубе отсутствует буровой раствор, то породы стремятся заполнить незакрепленную открытую часть ствола скважины или разорвать обсадку там, где она установлена.

Скважина глубиной 6710 м, графство Узбб (шт. Техас). Скважина пробурена фирмой "Шелл ойл", но никакой информации о ней нет. Известно лишь, что она находится в районе с очень высокими давлениями на глубине, и поэтому проблемы здесь аналогичны только что рассмотренным для скважины в Луизиане. Аномально высокие пластовые давления начинают проявляться на сравнительно небольших глубинах и становятся больше эквивалентной плотности бурового раствора в 2,16 кг/л. Можно полагать, что профиль давления по глубине, кривая изменения плотности бурового раствора, кривая градиента давления, приводящего к гидроразрыву, и система обсадки аналогичны только что приведенным для скважины в Луизиане.

Однако здесь имеется дополнительная сложность, связанная со значительной разностью давлений в различных слоях песчаника. Например, предположим, что песчаник залегает на глубине 3,66 км и имеет пластовое давление, эквивалентное напору бурового раствора плотностью 1,44 кг/л (51,7 МПа). В процессе бурения в этом песчанике при смене буровых головок потребуется плотность бурового раствора 1,48–1,5 кг/л, чтобы уравновесить это давление.

По мере достижения больших глубин в песчаных и сланцевых породах потребуется довести плотность раствора до 2,16 кг/л.

При рассмотренных условиях возникает еще одна проблема. На глубине 3,66 км песчаник должен выдерживать напор раствора с плотностью 2,16 кг/л. Статическое давление этого столба составляет 77,5 МПа, в то время как пластовое давление на этой глубине равно 51,7 МПа. Разность давлений в 25,8 МПа действует непосредственно на стенки скважины, вызывая проникновение бурового раствора в песчаник. Когда буровая труба неподвижна (например, во время соединения с другой трубой), то под действием указанной разности давлений буровая труба начнет заклиниваться в скважине. Данная проблема очень серьезна, и многие скважины были заброшены именно по этой причине.

На юге шт. Техас также очень сложны температурные условия. На глубинах 5,5–6,1 км температуры превышают 260°C, а градиент в среднем составляет ~4,6°C/100 м глубины. Если считать, что этот градиент существует и на больших глубинах, то на глубине ~12 км можно ожидать температуру выше 530°C. Столь высокие давления и температуры приводят к пластической деформации породы, что может вызвать прихват буровой трубы в скважине.

Скважина 9674Т №1 глубиной 5980 м, графство Минго, (шт. Западная Виргиния). Эта скважина при проектной глубине 6100 м была пробурена фирмой "Колумбия газ трансмисшн" и является самой глубокой скважиной в восточной части США. Во время бурения скважины возникли четыре основные проблемы: искривление скважины, высокие поровые давления, высокая твердость пород, низкая скорость бурения и условия, близкие к выбросу из скважины. Бурение скважины проводилось при следующих диаметрах и длинах колонн обсадных труб.

	Диаметр, мм	Длина, мм
Направляющая колонна обсадных труб	660	16,5
Верхняя колонна	508	500
Первая промежуточная колонна	340	1835
Вторая промежуточная колонна	273	3076
Третья промежуточная колонна	178	4980

На глубинах до ~4 км вместо буровой жидкости использовались воздух или природный газ. Однако при большом притоке воды в скважину применение воздуха нежелательно. Поэтому при неглубоком расположении водоносных слоев скважина должна была иметь обсадку. В то же время при использовании воздуха или природного газа бур

продвигается в глубину значительно быстрее, чем при использовании воды или бурового раствора. Однако при этом не обеспечивается достаточное статическое давление на проходимые породы. Именно поэтому на глубине ~ 4 км в рассматриваемой скважине наблюдалась тенденция к выбросу.

К счастью, обсадная колонна труб диаметром 273 мм была установлена достаточно глубоко, что обеспечило необходимое давление, не превышающее давление гидроразрыва, и тем самым создало условия для нормальной работы скважины. При таком диаметре было также обеспечено достаточное сопротивление выбросу на поверхность, что исключало его возникновение. Для поддержания потока газа потребовался буровой раствор с плотностью 2,18 кг/л.

Поровое давление на глубинах ниже 4 км в рассматриваемом районе является нормальным, но затем оно почти сразу становится эквивалентным плотности бурового раствора в 2,16 кг/л, а на глубинах до 6,1 км и далее почти не изменяется и соответствует плотности 1,92–2,16 кг/л.

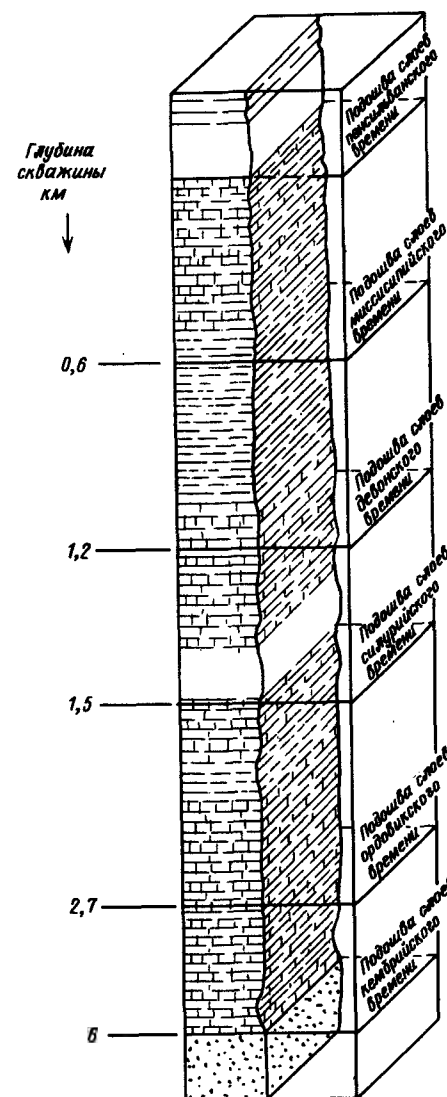
Из-за требуемого большого веса бурового раствора и высокой твердости пород, скорости бурения здесь оказались низкими. В табл. 2.1 приведены данные по скорости бурения и сроку службы различных буровых головок. Видно, что скорости очень низки, и что алмазные головки обеспечивают большую скорость бурения, чем трехшарошечные твердосплавные головки.

На фиг. 2.6 указаны породы, которые встретились при бурении этой скважины, и соответствующие интервалы глубин. Из-за твердости пород потребовались головки значительного веса, что привело

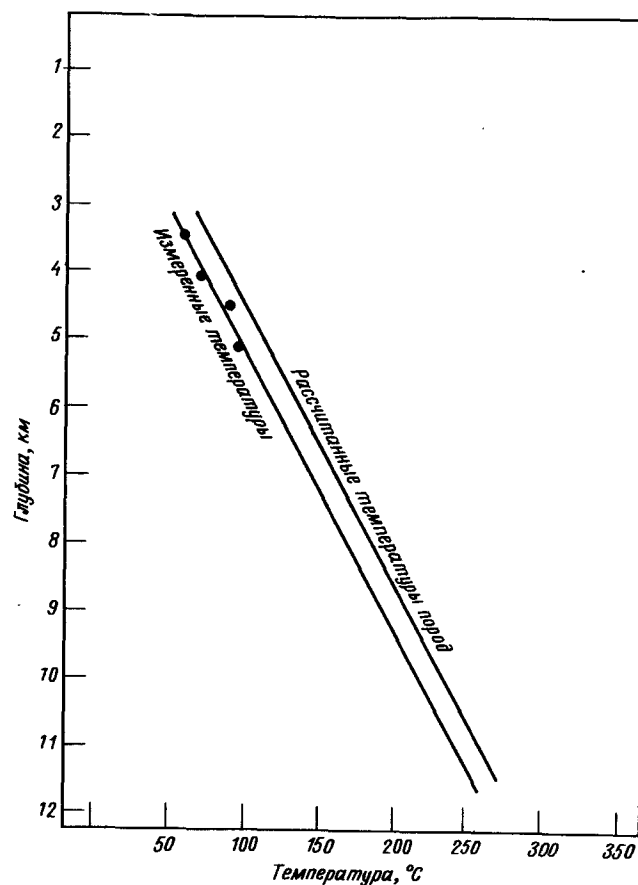
Таблица 2.1

Данные по скорости бурения и сроку службы буровых головок [1]

Буровая головка	Размер, мм	Тип головки	Интервал глубин, м	Срок службы, ч	Пройденная на головку, м	Скорость, м/ч
88	165	Алмазная	5786–5876	149	90	0,58
89	165	Твердосплавная	5876–5905	79	33	0,41
90	165	Алмазная	5905–5964	92	55	0,6
91	165	Твердосплавная	5964–5972	21,25	8	0,4



Фиг. 2.6. Последовательность формаций при бурении скважины 9674Т №1 (шт. Западная Виргиния) [1].



Фиг. 2.7. Профили температур скважины 9674Т № 1 (шт. Западная Виргиния) [1]

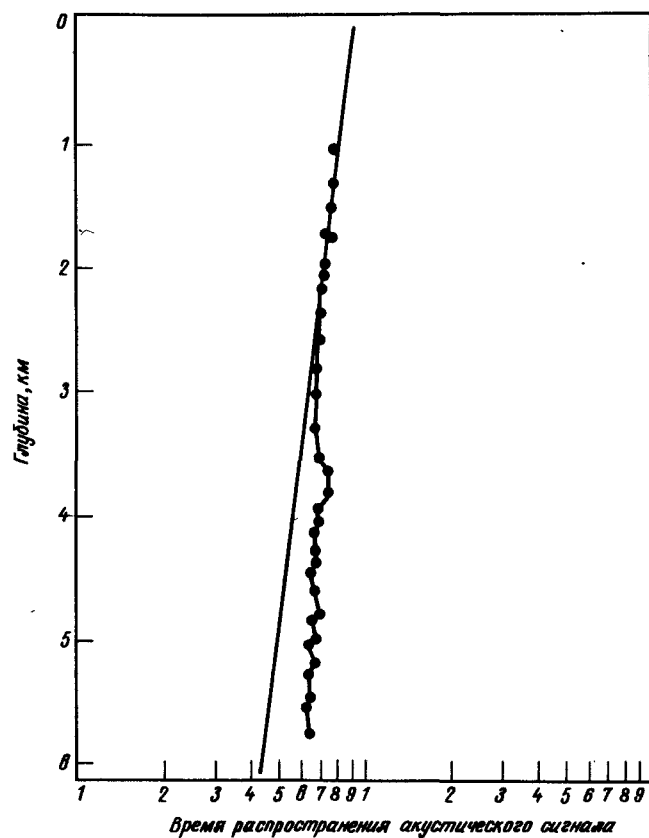
при первом бурении к искривлению скважины. Искривление было столь значительным, что потребовалось заполнение ствола цементом и повторное медленное вертикальное бурение. (Следует отметить, что сверхглубокие скважины должны быть вертикальными или почти вертикальными для исключения сильного износа буровых труб.)

Геотермический градиент в толще пород этого района очень низок. На фиг. 2.7 показано изменение температуры по глубине рассматриваемой скважины. Действительные температуры пород обычно несколько выше измеренных из-за влияния циркуляции бурового раствора.

Скважина Уэген-Уилл № 1 глубиной 7000 м, графство Саблетт (шт. Вайоминг). Скважина пробурена фирмой "Эль-пазо нейчрел гэз". При бурении возникло сравнительно мало трудностей. Временами нарушалась циркуляция раствора, что было вызвано слишком быстрым движением в скважине колонкового бура. Кроме этого, произошел прихват буровых труб вместе с переходными муфтами на глубине 1,95 км во время попыток восстановить циркуляцию. Основная зона нарушения циркуляции находилась на глубине 1,83–2 км. Скважина пробурена строго вертикальной легкими буровыми головками. В связи с этим скорости бурения были очень низки, и это потребовало дополнительных затрат времени. После бурения проведено измерение параметров по разрезу скважины, а затем скважина была разбурена до диаметра 375 мм перед спуском промежуточной колонны труб. Это также потребовало значительного дополнительного времени. Единственными трудностями при бурении под промежуточную колонну были пульсации плотности бурового раствора. Данные акустических измерений были расшифрованы и результаты представлены на фиг. 2.8. По этим данным были определены перепады порового давления, приведенные на фиг. 2.9. На этом графике представлена также кривая фактической плотности бурового раствора во время бурения скважины меньшего диаметра.

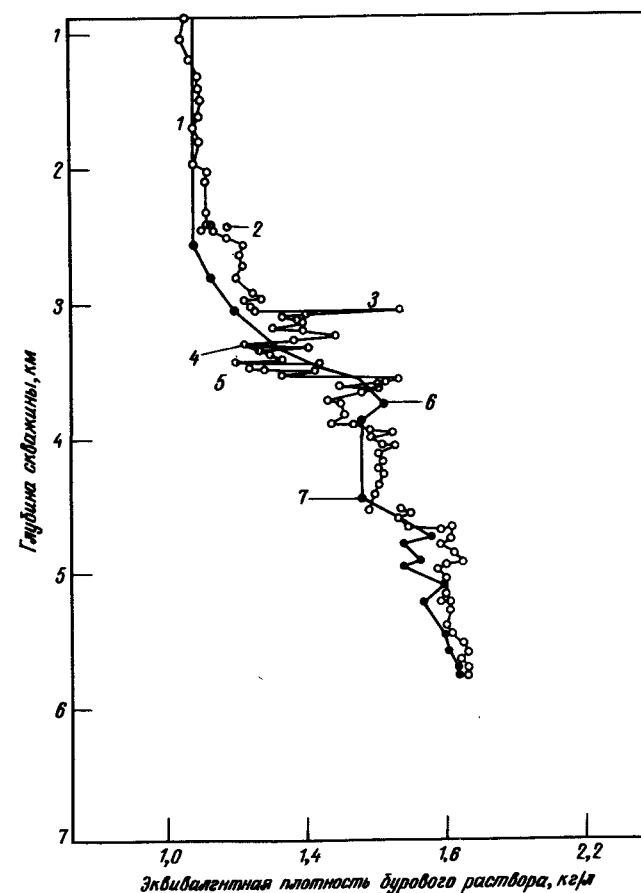
Следует отметить, что бурение скважины все время проходило в условиях "недосбалансированных" или "почти сбалансированных" давлений и что измерения давления в буровой колонне согласовались с результатами акустической диагностики. Пульсации плотности бурового раствора на определенной глубине составляли $\sim 0,36$ кг/л и даже более. Так, на глубине 3,1 км плотность бурового раствора за очень короткий период изменилась от 1,26 до 1,67 кг/л и выбросы раствора прекратились.

Такие большие изменения плотности бурового раствора могли происходить из-за: а) воды, поступающей в скважину, и б) воды, поступающей в буровой раствор через систему охлаждения и смазки насосов. Но так как напор раствора превышал пластовые давления, то весьма сомнительно, чтобы вода могла поступить в скважину выше глубины 3,3 км, где наблюдались колебания плотности раствора.



Фиг. 2.8. Акустическая диагностика скважины Уэган-Уилл № 1 (шт. Вайоминг) [1].

Следовательно, разжижение раствора могло происходить лишь через насосы. Глинистые сланцы были в значительной степени размыты и потребовалось дополнительное цементирование. Однако размывание не было основной причиной неудачной цементации промежуточной колонны обсадных труб диаметром 273 мм – первой неудачи при бурении этой скважины. Работу пришлось вести в три стадии, поскольку нарушение циркуляции происходило вначале на глубинах 1,83–2,14 км, а затем при установке в скважине обсадных труб, когда башмак обсадной



Фиг. 2.9. Изменения порового давления по глубине скважины, определенные с помощью акустической диагностики и по действительной плотности использованного бурового раствора [1].

1 – прихват буровых труб и переходных муфт; 2 – опробыватель пластов № 2; 3 – нарушение циркуляции; 4 – опробыватель пластов № 4; 5 – нарушение циркуляции; 6 – выброс из скважины; 7 – перепад порового давления, определенный с помощью акустической диагностики.

колонны находился на глубине 2,07 – 2,53 км. При обсадке использовалось такое оборудование, как направляющий башмак, муфта обсадной трубы с обратным клапаном, центраторы, а также заливочные манжеты для цементирования и др.

Цементирование затрубного пространства обсадных колонн диаметром 273 и 194 мм, проведенное в апреле 1970 г., оказалось неудачным в первом случае из-за искривления колонны, а во втором – из-за преждевременного затвердевания бурового раствора.

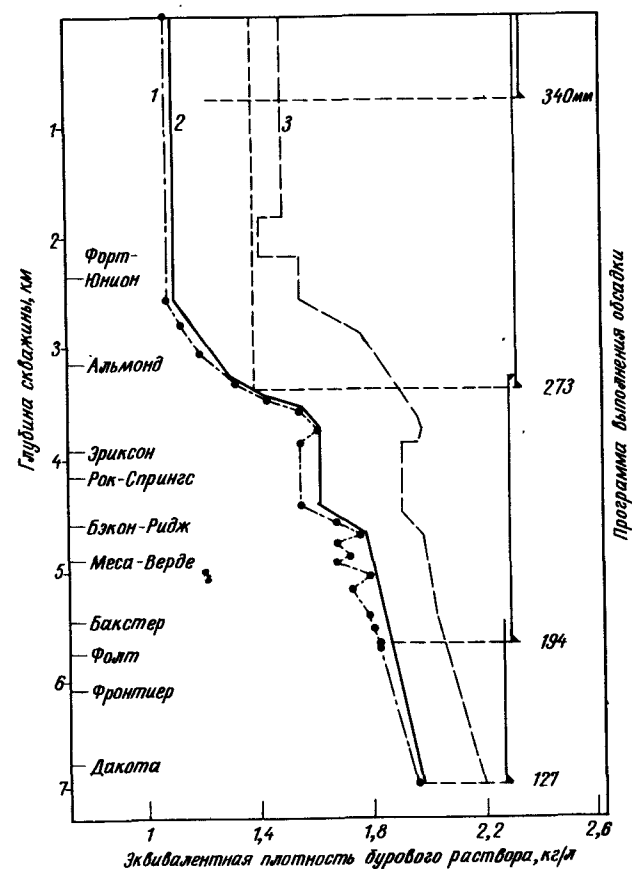
На фиг. 2.10 и 2.11 приведены все данные, использованные при проектировании такой скважины общей глубиной ~ 7000 м. Отметим, что целью было достижение на полной глубине скважины диаметра 165 мм и возможности установки обсадных труб диаметром 127 мм. Температуры на глубине 6 – 7 км составляли 218 – 232°С, т.е. были не очень высокими. Следовательно, как указывалось выше, основными проблемами при бурении этой скважины были трудности цементирования, неисправности обсадки и аномально высокие давления.

Итак, как показывают приведенные примеры, основным подходом к глубокому бурению в осадочных породах является использование стандартных методов бурения. Однако установка колонн обсадных труб, очень высокие давления и температуры и их влияние на элементы всей системы на больших глубинах создают серьезные проблемы. Существуют и другие методы создания глубоких выработок большого диаметра, не сужающихся с глубиной. Эти методы включают бурение скважин большого диаметра, как это делается при бурении вулканических пород на полигоне Комиссии по атомной энергии США в шт. Невада, а также бурение обычных скважин с помощью управляемых человеком или полуавтоматических, или полностью автоматизированных систем. Эти методы разрабатываются и представляются перспективными для создания глубоких скважин. Но для этого требуются значительные расходы.

НАПРАВЛЕНИЯ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Извлечение геотермальной энергии можно проводить различными способами: путем бурения множества неглубоких скважин или нескольких глубоких скважин большого диаметра в вулканических (изверженных) породах. Выбор должен определяться экономическими соображениями.

Так как глубокое бурение начало развиваться прежде всего для разведки нефти и газа, то естественно, что при этом не могли быть учтены особенности бурения в породах вулканического происхождения.



Фиг. 2.10. График работ при сооружении скважины Уэген-Уипл № 1 (шт. Вайоминг) [1].

1 – расчетное поровое давление; 2 – расчетная плотность бурового раствора; 3 – расчетное давление, вызывающее гидроразрыв.

Соответствующие проблемы были рассмотрены в работе [3]. На основании этих и ряда других рассмотрений можно заключить, что бурение глубоких скважин для извлечения геотермальной энергии в основном должно быть сконцентрировано в породах вулканического происхождения. Эту точку зрения поддерживают сотрудники Лос-Ала-

Глубина, км	Кровля на- пластования и тип формации	Проблемы бурения	Тип оценки формации	Обсадочка		Период дав- ления, бар, в зоне бурения	Поровое давление, МПа	Буровой раствор удельный вес, кг/л	Тип
				Диаметр скважины, мм	Диаметр, м				
1	Аркозе	Размывание сланцев	IES, ну́тромер	445	340 760	1,5	1,08	1,1	Лисенсуформатная система ↓ Вода и гель
2	Пески и глинистые сланцы	Прихваты и нарушение циркуляции				1,42			
3	Форт- Юнион	Начало участка аномального давления	Каротажным прибором в буровом рас- творе, начиная с данного места						
	Пески и глинистые сланцы		IES, ну́тромер	371	273 3420	1,92	1,39	1,4	
4	Альмонд	Конец первой переходной зоны давления							
5	Эрикссон	Начало зоны более высокого давления	IES, акустический прибор, ну́тромер	241	194 5730	2,11	1,84	1,87	
6	Рок- Спрингс	Зона неизвестных давлений	IES, акустический прибор, FDC, SNP, DIP, ну́тромер	165					
7	Бэкон- Ридж Меса- Верде	218-232 °C на конечной глубине скважины			127 7000		1,97	2,0	
8	Бакстер Глинистые сланцы								
	Фронтисер								
	Дакота								

Фиг. 2.11. Предложенный план сооружения скважины Уэген-Уилл № 2 в графстве Саблетт (шт. Вайоминг) [1].

мосской научно-исследовательской лаборатории, которые проводят геотермические исследования на гранитных породах и планируют достигнуть глубины ~4,5 км.

Технологические трудности и ограничения СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ

Глубина. Одно из ограничений по глубине скважин при их бурении обычными методами связано с длиной колонны буровых труб, поднимаемых и вновь опускаемых при смене буровых головок. Известно, что эта длина может превышать 9 км, а при благоприятных геологических условиях достигать 15 км. Однако эффективность работы труб резко понижается с увеличением глубины, приводя к экспоненциальному росту стоимости бурения.

Температура. Все бурильные операции в настоящее время ограничены температурой ~315°C, так как при приближении к этой температуре буровые и цементные растворы становятся неустойчивыми, а измерительная аппаратура быстро выходит из строя и дает искаженные показания. В некоторых случаях были достигнуты температуры до 370°C.

Диаметр скважины. Диаметр скважин при бурении обычно невелик, но он должен быть достаточным для установки колонн обсадных труб, способных выдержать высокое поровое и пластовое давления. Чем глубже скважина, тем более разнообразны литологические показатели по ее длине, тем больше существует различных зон давления и тем больший диаметр скважины требуется в начале бурения.

Способность стенок скважины противостоять сдавливающему действию статического давления зависит от отношения диаметра обсадных труб к толщине их стенок, а также от качества стали, из которой они изготовлены (фиг. 2.5). Чтобы избежать смятия в зонах высокого давления в породах различного типа, может потребоваться несколько колонн толстостенных обсадных труб. Но это может привести к тому, что диаметр на забое скважины может уменьшиться до нуля.

Если скважина заполнена относительно тяжелым буровым раствором, то он может легко уравновесить поровое и пластовое давления. Но при замене тяжелого бурового раствора водой или газами давление может стать угрожающим. Например, ни одна из обычно применяемых обсадных труб в случае, если она не заполнена раствором, не может выдержать поровое давление, равное 138 МПа. Исключение составляет высококачественная сталь V-150 при отноше-

нии диаметра к толщине стенки, равном 13. Для более распространенной стали Р-110 потребуется величина этого отношения, равная ~ 9 (фиг. 2.5), но таких соотношений обычно нельзя получить. (Фирма "Юнайтед стейтс стил", например, продает трубы из стали марки Р-110 с отношением диаметра к толщине стенки 20 : 13 при наружных диаметрах (114 – 340 мм.)

Так как на глубинах ~ 15 км для скважин в осадочных породах следует ожидать давлений до 344 МПа, то требования большого диаметра скважины, необходимости удаления из нее бурового раствора и обеспечения сопротивления смятию вступают в противоречие друг с другом, создавая основную проблему в выборе подходящего диаметра скважин.

Давление. Аналогично тому, как температура и геотермический градиент ограничивает глубину скважины, так и давление сказывается на ее диаметре. Высокие давления при современном уровне технологии способны выдержать лишь обсадные трубы малого диаметра (~ 110 мм). Разрез одной из таких скважин показан, например, на фиг. 2.6. На глубинах 3 – 4,9 км поровые и пластовые давления возрастают с глубиной, в связи с чем требуется установка нескольких колонн обсадных труб, соединенных замками. На глубинах 4,9 – 7,3 км высокие давления практически не изменяются. На таких глубинах проходка скважины может происходить при использовании тяжелого бурового раствора с плотностью 2,16 кг/л, чтобы противостоять высоким давлениям. Ниже 7,3 км поровые пластовые давления понижаются до величины, эквивалентной удельному весу бурового раствора 1,56 кг/л. Здесь бурение может проводиться обычными способами. Считается, что аномально высокие давления встречаются почти всегда при бурении в осадочных породах.

Такие давления приводят к ограничению диаметра скважин при роторном бурении и заставляют принимать специальные меры предосторожности. Методы защиты от высоких давлений в скважинах большого диаметра и при выемке грунта только начинают разрабатываться. В частности, исследуются строительные пластмассы с повышенными механическими свойствами. Кроме того, поскольку полагают, что высокие пластовые давления существуют лишь в осадочных породах, продолжается исследование бурения в вулканических породах.

Вид породы. Высокое пластовое давление в осадочных формациях в настоящее время порождает технологические трудности. До тех пор пока не будут разработаны методы сопротивления давлению в газонаполненных скважинах, глубокое бурение или выемка грунта будут приурочены к изверженным породам.

Геологоструктурные барьеры. В изверженных породах основные осложнения на любой глубине связаны с трещиноватостью и раздробленностью пород. Практически невозможно встретить монолитный массив гранита мощностью до 15 км. Тем не менее вода, движущаяся в трещинах таких систем под действием конвекции, представляет собой выгодный источник геотермальной энергии при ее извлечении через глубокую скважину, хотя ее присутствие и усложняет проведение бурения.

Экономические барьеры. При любом процессе выемки грунта именно назначение данного сооружения определяет допустимые затраты. Например, затраты на сооружение геотермальной скважины не должны быть очень высокими, поскольку при этом стоимость получаемой электроэнергии будет также слишком высокой. Однако при многоцелевом назначении сооружения, например для исследования и разработки методов бурения, для систем связи и для удовлетворения специальных военных нужд, можно привлечь дополнительные средства на это сооружение.

Технологические барьеры. Прочность сталей, применяемых при бурении, определяется как требованиями самой буровой промышленности, так и возможностями современной технологии. Хотя в настоящее время длина стальных буровых труб ~ 9 км представляется предельной, поскольку трубы обрываются под действием собственного веса, некоторые специалисты по бурению полагают, что при благоприятных геологических условиях бурение можно производить на глубине до 15 км. И хотя, по-видимому, не глубина является основным ограничивающим фактором в настоящее время, тем не менее о каких-либо планах бурения на глубине более 15 км неизвестно. В Советском Союзе и в ряде европейских стран ведутся работы по созданию новых сплавов, но пока эти сплавы не превосходят по своим свойствам стали, используемые при бурении.

Допустимые напряжения в обсадных трубах ограничены характеристиками обычных обсадных труб, используемых в нефтяной и газовой промышленности. Сопротивление разрыву, или прочность обсадки, определяется по отношению наружного диаметра к толщине стенок. Это отношение обычно ограничено пределом 10–40, причем наиболее принято отношение 20. Однако, чтобы скважины были пройдены в условиях очень высоких пластовых давлений, имеющих место при сверхглубоком бурении, требуется отношение менее 10. Такие обсадки технологически выполнимы, но их можно изготовить только по специальному заказу, что требует времени и значитель-

ных расходов. В настоящее время не предпринимается попыток изменить такое положение.

Нагрузка на крюке современных буровых установок ограничивает максимальный вес обсадки до ~450 т. Эта нагрузка по мере создания нового и специализированного оборудования будет постепенно повышаться.

Температурные ограничения для буровых растворов остаются непреодолимыми. Обсуждения, проведенные в ведущих научно-исследовательских лабораториях штатов Техас и Оклахома, показывают, что каких-либо изменений не предвидится. В настоящее время все буровые растворы на водной или масляной основе становятся неработоспособными при температурах выше 315°C.

То же самое относится и к цементу. В настоящее время надежное цементирование при температурах выше 315°C не представляется возможным. При таких температурах вода в цементе вскипает и испаряется до начала его затвердевания. Цементный порошок после этого выносится из скважины паром. Имеется успешный опыт цементирования нескольких скважин в шт. Калифорния при температурах выше 370°C. Цемент при этом насыщали специальными химическими реагентами. Тем не менее использование этого метода на больших глубинах при неизбежной задержке между подготовкой цементного раствора и процессом цементирования весьма сомнительно.

Приборостроительная промышленность, изготавливающая аппаратуру для исследования скважин, предприняла попытки обеспечить ее надежность при температурах 260–315°C. Сообщалось, что работа при температурах до 650°C, по крайней мере в течение нескольких часов, становится возможной.

Другие трудности, связанные с оборудованием, такие, как передача энергии на забой и стоимость бурения, требуют дальнейшего изучения и разработок. В настоящее время с ростом глубины энергия, передаваемая на забой, понижается, в то время как расходы на бурение экспоненциально возрастают.

Не следует ожидать, что устранение указанных технологических ограничений произойдет быстро или без учета нужд бурильной промышленности. Что же касается непосредственно освоения геотермальных ресурсов, то наилучшим решением представляется подход, при котором учитывается современный уровень технологии и проводится тщательный выбор расположения, глубины и состава пород.

НАПРАВЛЕНИЯ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

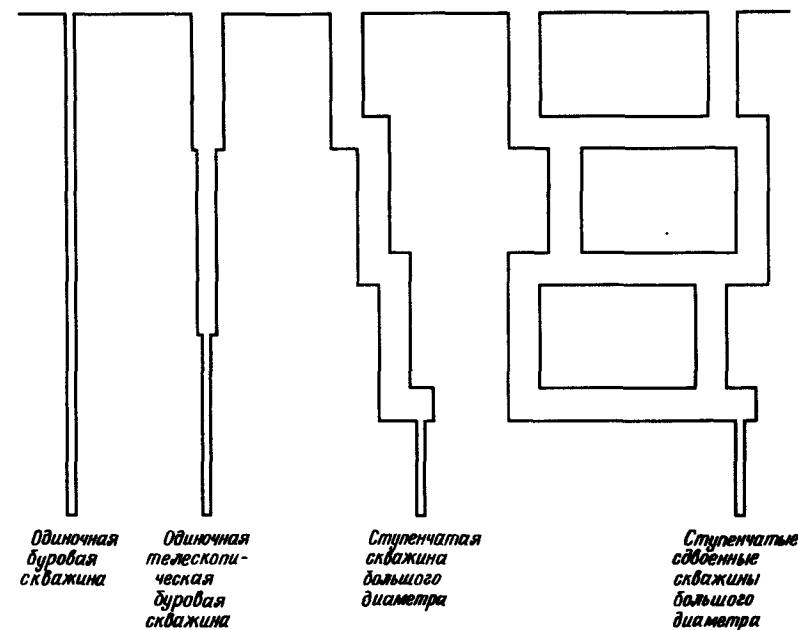
В дополнение к устранению или расширению существующих барьеров или ограничений, которые только что были рассмотрены, необходимо создание новых методов и оборудования. Конечно, можно добиться определенных успехов и при современном уровне технологии, однако глубина 15 км до сих пор остается предельно достижимой. Основные усилия, очевидно, должны быть сконцентрированы на бурении на большие глубины. Кроме того, методы бурения при освоении геотермальной энергии остаются менее развитыми, чем в нефтяной и газовой промышленности. На необходимость совершенствования этих методов было указано в предыдущих разделах.

Совершенствование современных методов бурения СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ

В данном разделе будет рассмотрено несколько методов глубокого бурения. Типы скважин, полученных при использовании этих методов, показаны на фиг. 2.12.

Одинокная буровая скважина. Типичной при глубоком бурении является одинокная скважина, получаемая при роторном бурении в осадочных породах (фиг. 2.12). Хотя такая скважина является наиболее экономичной при бурении на большие глубины, она обладает многими недостатками. В осадочных породах диаметр скважины в общем случае не может оставаться постоянным, а должен сокращаться с глубиной из-за необходимости крепления скважины обсадными трубами. Поэтому запланированная конечная глубина не может быть превышена путем простого изменения проекта бурения, поскольку при этом слишком малым становится диаметр скважины. Кроме того, скважина все время должна быть заполнена буровым раствором для противодействия пластовому давлению. Любые измерения по разрезу скважины и в проходимых породах ограничены, так как затруднен доступ через колонну обсадных труб и соответствующее предохранительное оборудование.

Однако при бурении в изверженных породах существует целый ряд способов повышения эффективности бурения. Роторный метод дробления и измельчения породы был усовершенствован путем использования водяных струй, гидравлических и турбинных двигателей, устанавливаемых на забое скважины, а также путем использования бурового инструмента большого диаметра. Эти усовершенствования привели к увеличению скоростей проходки без каких-либо значительных изменений в существующих методах бурения, которые используются для проходки на глубины до 9 км, но ограничены глубиной



Фиг. 2.12. Типы глубоких скважин [1].

15 км. Значительные усилия в последнее время были сконцентрированы на усовершенствовании и создании новых буровых головок с увеличенным сроком службы, что позволяет сократить число операций подъема и спуска буровых труб. Однако ни одно из указанных усовершенствований для однотрубной скважины не позволит достичь глубин, превышающих 15 км.

Телескопическая скважина. Телескопическая скважина (фиг. 2.12) позволяет использовать различные технологии бурения и порядок ведения работ, включая возможные временные задержки при переходе к следующей ступени. Бурение таких скважин проводится в Советском Союзе. Сначала могут использоваться обычные методы роторного бурения, затем на глубинах до 9 км — автоматическое роторное бурение, которое ускоряет работы с бурильными трубами на поверхности. На завершающем этапе бурения скважины можно использовать более совершенные турбобуры.

Использование буров большого диаметра при проходке ствола под первую колонну позволяет сократить время спуска и подъема буровых труб, а следовательно, повысить эффективность и снизить затраты на бурение. Затраты на бурение ствола большого диаметра не превышают обычных затрат при роторном бурении. Постепенное изменение диаметра скважины может поэтому привести к линейному росту затрат с увеличением глубины, в то время как обычно они возрастают экспоненциально. Дополнительные преимущества скважин большого диаметра будут рассмотрены далее.

Ступенчатая скважина большого диаметра. Такая скважина большого диаметра (фиг. 2.12) является следующим этапом развития только что описанной скважины, в которой лишь первая ступень имеет большой диаметр. В данном случае скважина большого диаметра продолжается вниз ступенчато и со сдвигами.

Такую скважину можно пройти с помощью роторного бурения, полуавтоматического и автоматического бурения или с помощью взрывов. Преимущества скважины большого диаметра: доступность забоя скважины для человека, возможность создания горизонтальных туннелей, образование нескольких ступенчатых стволов, расположенных один над другим, и постоянный большой диаметр.

Ступенчатые сдвоенные скважины большого диаметра. Использование сдвоенных скважин большого диаметра (фиг. 2.12) имеет ряд значительных преимуществ. Около 50% раздробленного грунта можно извлечь механическим способом после его сбора в забое, а не с помощью бурового раствора. Такая система обеспечивает двойной доступ почти ко всем точкам, а также вентиляцию и охлаждение.

Важнее всего, что любая глубина может быть выбрана за новый рабочий уровень, что понижает затраты на бурение по сравнению с сооружением одной обычной глубокой скважины. Поскольку при сооружении сдвоенных скважин могут быть использованы строительные методы и большая часть оборудования становится непосредственно доступна человеку, то все это способствует завершению строительства в соответствии с планами.

Бурение сверхглубоких скважин с помощью роторных методов становится недопустимо дорогим. Так, при нормальных геологических условиях стоимость скважины глубиной 15 км при роторном бурении может составить 20–30 млн. долл. Из этой стоимости затраты на соответствующие интервалы глубин составляют:

Интервалы глубин, км	Затраты, %
0 – 3	3
3 – 6	6
6 – 9	13
9 – 12	26
12 – 15	52

При двухствольной системе скважин большого диаметра скважины глубиной 3 км могут быть выполнены и ниже уровня в 15 км при сохранении низкой стоимости бурения. Хотя подобное решение может значительно снизить затраты на бурение сверхглубоких скважин, но при этом необходимо создавать системы жизнеобеспечения на различных уровнях, что в свою очередь может повысить стоимость всей системы. Подробный анализ технико-экономических показателей такой системы необходимо проводить по мере развития техники и новых методов бурения. Из рассмотрения этих методов можно сделать следующие выводы.

1. Ни один из известных и используемых методов бурения скважин не может быть рекомендован для проходки на очень большие глубины. Эти методы включают роторное бурение и его модификации – турбобурение, бурение скважин большого диаметра, бурение с помощью высоконапорных струй или путем плавления породы; автоматические, полуавтоматические методы и с ручным управлением, а также комбинации бурения, разрушения взрывом и подъема породы.

2. Ни один из методов бурения не является экономичным при создании сверхглубоких скважин. Вероятно, лишь сочетания различных методов смогут обеспечить приемлемые характеристики и экономические показатели, отвечающие конъюнктурным соображениям.

3. Весь процесс создания скважины должен быть спланирован и определен до начала работ. Если используются ступени, каждая из них должна быть объединена с любой другой ступенью.

4. Начальный диаметр скважины должен быть по возможности большим, а его сужение по глубине – минимальным. Лишь это может позволить осуществить проходку скважины на большие глубины.

5. Чтобы двоянные скважины могли соединяться на любом уровне, они должны буриться одновременно и быть

расположены на близком расстоянии друг от друга. При определенных условиях проходка двух соединенных скважин на большие глубины может привести к снижению затрат, позволит применять специальные методы освоения геотермальных ресурсов и улучшит эксплуатацию скважины.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ БУРОВЫЕ УСТАНОВКИ

В настоящее время имеются установки для роторного бурения на глубины до 12 км. Одна такая установка была использована для бурения скважины глубиной 10,5 км и с ее помощью предполагалось пробурить еще одну сверхглубокую скважину (установка В, табл. 2.2). В табл. 2.2 приведены основные данные по трем мощным установкам для роторного бурения, выпускаемых фирмой "Лофланд бразерс дрilling". Несомненно, что со временем будут созданы новые типы установок для сверхглубокого бурения.

Таблица 2.2

Типичные узлы мощных буровых установок [1]

Узел	Установка		
	А	Б	В
Мачта			
Высота, м	44,8	44,8	43,3
Вес, т	590	590	907
Двигатель			
Мощность, МВт	2,240	2,980	2,240
Фундамент			
Высота, м	9,75	9,75	8,53
Нагрузка, т	340	340	500
Станок роторного бурения			
Проходное отверстие для ротора, мм	950	950	950
Вес станка, т	500	500	
Основные насосы для бурового раствора	Два по 1,04 МВт	Два – 1,305 и 0,746	Два по 1,23
Мощность, МВт	каждый		каждый
Передвижной блок			
Нагрузка на крюке, т	525	525	750
Поворотное устройство			
Нагрузка, т	400	400	650
Канат			
Диаметр, мм	38,1	38,1	33,3

НАПРАВЛЕНИЯ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Как уже указывалось в этом разделе, следует продолжить исследование систем сдвоенных ступенчатых скважин большого диаметра, причем основное внимание следует уделить экономическому анализу. Представляется также целесообразным изучение методов бурения и их совершенствование, а также выяснение условий, определяющих срок службы оборудования, включая влияние различных геологических условий.

Новые методы СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ

Наиболее существенные проблемы при сверхглубоком бурении связаны с наличием высоких температур и давлений. Эти проблемы, а также некоторые новые методы их решения, предложенные и изучаемые в настоящее время, были подробно рассмотрены выше. Теперь кратко рассмотрим новую технику для роторного бурения, предназначенную прежде всего для достижения больших глубин.

Обсадные трубы. Трубы, используемые в настоящее время на нефтяных месторождениях, можно использовать для обсадки скважин глубиной 12 км и более. Необходима разработка таких специальных методов, как спуск обсадной трубы по буровой трубе до забоя скважины, цементирование на месте и последующее извлечение обсадной трубы на поверхность. Такая процедура требуется из-за больших растягивающих усилий, действующих на верхние части длинных колонн обсадных труб в процессе их спуска. Разработаны специальные обсадные трубы с размерами, соответствующими стандартным буровым головкам для более глубокого бурения. Следует продолжить эти разработки, а также использовать высокопрочные стали в качестве материала обсадных труб.

Бурильные трубы. Разработка бурильных труб для обычного бурения производится с учетом того, что телескопический ствол может быть выполнен на глубину более 12 км. Но если буровая головка на больших глубинах начнет заклиниваться (прихватываться), то бурильная труба сможет обеспечить лишь малое дополнительное усилие, чтобы снова сдвинуть головку. Поэтому потребовалось создание более прочных сталей для бурильных труб. Разрабатываются трубы из сталей новых марок с различными размерами. В табл. 2.3 приведены максимальные длины обычных бурильных труб, находящихся в подвешенном состоянии перед началом деформации под

Таблица 2.3

Максимальная длина свободно подвешенной бурильной трубы, изготовленной из стали марки Е, перед возникновением остаточной деформации

Размер, трубы, мм	Вес, кг/м	Сопротивление разрыву, т	Максимальная длина перед деформацией, км
73	15,5	97	6,27
88,9	23,1	147	6,35
114,3	29,8	187	6,28
139,7	36,8	226	6,14

Таблица 2.4

Характеристики одиночных колонн бурильных труб, обеспечивающие проходку на глубины ~9 км (при нагрузке на буровую головку 45 т) [1]

Диаметры труб, мм	Вес, кг/м	Марка стали	Длина, м	Достижимая глубина, км
120,7 × 50,8			183	
Соединительные муф-				
ты 88,9	14,14	E	2931	
	14,14	G	2941	
	23,1	E	1082	
	23,1	G	994	
	23,1	S	2542	10,62
190,5 × 63,5				
Соединительные муф-				
ты 114,3			183	
	24,7	E	3200	
	24,7	G	997	
	24,7	S	2429	
	27	S	1082	
	29,8	S	1512	9,4
215,9 × 76,2				
Соединительные муф-				
ты 127			244	
	24,2	E	1616	
	24,2	G	2875	
	24,2	S	2463	
	29	S	2271	9,47

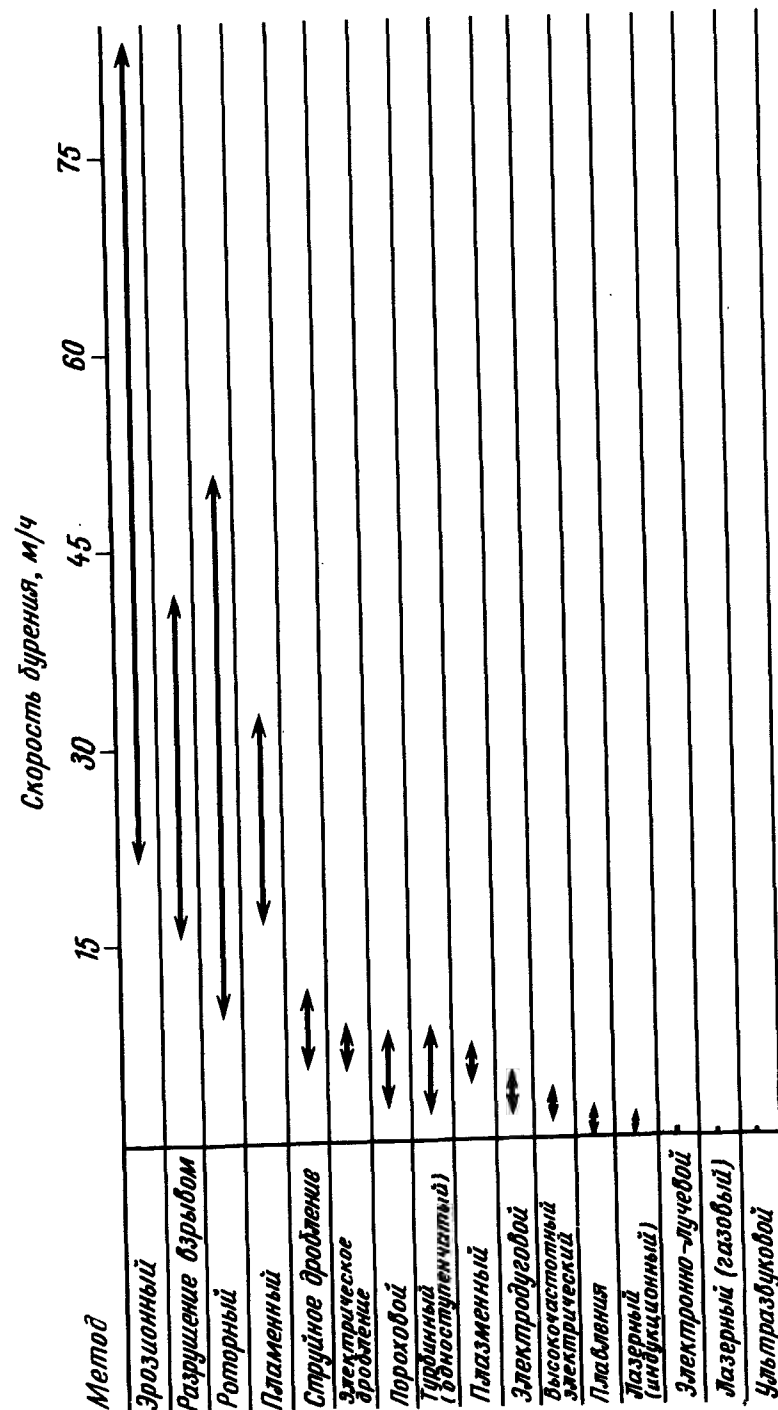
действием собственного веса. В табл. 2.4 приведены оптимальные сочетания различных марок сталей и размеров труб, обеспечивающие достижение глубин более 9 км при нагрузке, приложенной к буровой головке ~ 45 т.

При сверхглубоком бурении из-за нестабильности пород может оказаться трудным и даже невозможным поднять бурильную трубу для смены головок, каротажа или крепления скважины обсадными трубами. Одна из новых перспективных технологических разработок заключается в использовании длинной бурильной трубы, которая продвигается на максимально достижимую глубину, а затем после подъема внутри нее буровой головки на поверхность цементируется на месте. После этого бурильная труба выполняет роль колонны обсадных труб и защищает следующую бурильную трубу, которая после проходки также становится обсадкой. Такая технология позволит проводить бурение даже в пластичных, непрочных породах и доводить телескопический ствол до очень больших глубин. Однако пока это всего лишь проект, хотя уже сейчас в некоторых продуктивных скважинах в качестве обсадных труб используются специально приспособленные для этой цели бурильные трубы.

Буровые головки. Предложено, опробовано и усовершенствовано много новых методов бурения, из которых следует упомянуть метод искрового разряда (эрозионный), разрушения взрывом, с помощью факела пламени (пламенный), струйного и электрического дробления, пороховой, турбинный (одноступенчатый), плазменный, электродуговой, высокочастотный электрический, плавления, лазерные, электронно-лучевой и ультразвуковой. Проводится также исследование различных комбинаций этих методов. На фиг. 2.13 приведены скорости бурения в породе средней прочности при использовании этих методов и инструментов.

Современные буровые головки значительно усовершенствованы по сравнению с применявшимися несколько лет назад. Новые головки бура с радиальными подшипниками и пластинками из карбида вольфрама для дробления породы обеспечили достаточно высокие скорости бурения на глубинах 7,5–9,0 км. Подшипники позволяют продлить срок службы головок на забое до 50–60 ч даже в таких тяжелых условиях. Полагают, что с помощью уже имеющихся головок можно достигать глубин до 15 км. В табл. 2.5 приведены средние скорости бурения, проходка на головку и другие данные для некоторых буровых головок.

Затраты времени при смене буровых головок. Для самого процесса бурения время, затрачиваемое на извлечение износившейся



ф и г. 2.13. Скорости бурения в породе средней прочности при использовании новых методов бурения [1, 4].

Таблица 2.5

Используемые головки бура и их характеристики [1]

Интервал глубин, м	Тип головки	Число головок	Размер, мм	Средняя скорость бурения, м/ч	Прходка на головку, м	Нагрузка на головку, кг	Скорость вращения, об/мин
0—36,3	"Рыбий хвост"	1	685,8				
36,3—1120 ¹⁾	Шарошечное долото	2	381	21,5	542	5443—6804	225
1120—3816	То же	10	374,6	7,4	269,6	4536—22680	100—175
3810—6020	" "	31	241,3	2,84	60,2	6804—18144	80—125
	Алмазная	2	241,3	0,78	166,7	15876	120—140
	" "	1	198,4				
	Шарошечное долото	1	241,3	Используются для бурения в верхней части			
6020—7280	То же	1	165,1	0,59	7,62	11340	90
	Алмазная	1	163,5	0,74	53,3	4536—5443	100
	" "	5	165,1	1,2	235,9	5443—6804	150
	Фреза	1	157,2		5,8		

¹⁾ Скважина диаметром 381 мм расширена до диаметра 559 мм с помощью направляющего долота.

Таблица 2.6

Распределение общего времени бурения, составившего 228 сут, на различные операции при бурении скважины в Толпи, графство Виктория (шт. Техас) [1]

Операция	Доля общего времени, %
Бурение и расширение скважины	50
Спуск и подъем бурового инструмента	20
Осмотр и ремонт оборудования	8
Каротаж, взятие проб и т.д.	6
Циркуляция бурового раствора и охлаждение ствола скважины	5
Спуск обсадных труб, крепление и цементирование	6
Извлечение инструмента из скважины	1

головки из скважины, ее смену и установку новой головки на место, является непроизводительным. Но именно эти операции занимают значительную часть общего времени, затрачиваемого при бурении любой скважины (табл. 2.6).

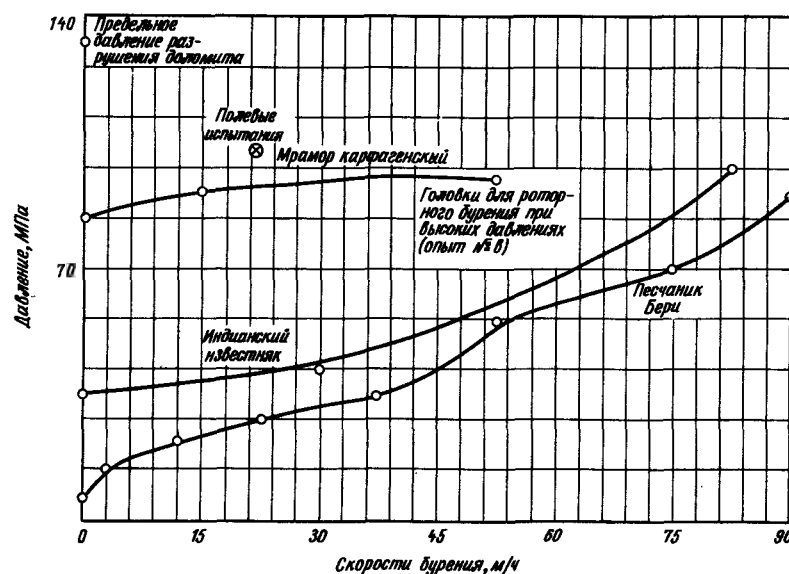
Множество осложнений в нижней части скважины связано со сменой головок. Поэтому основной задачей является исключение этой операции. До сих пор сделать это не удавалось. Имеется много идей и предложений по уменьшению числа операций спуска и подъема бурового инструмента и сокращению времени на их выполнение. Следует упомянуть следующие: 1) улучшение буровых головок, заключающееся в увеличении скоростей бурения и времени их службы; 2) создание головок, которые могли бы извлекаться и заменяться через бурильную трубу с помощью канатов, и 3) создание средств для подъема более длинных бурильных труб. Например, спуско-подъемные операции займут меньше времени, если бурильную трубу можно наматывать на катушку или поднимать частями длиной по ~300 м, а не как обычно длиной в 28 м. Действительное время спуско-подъемных операций на различных глубинах для одной из самых глубоких скважин мира таково:

Глубина, км	Время спуско-подъемной операции, ч
3,05	8
4,57	13
6,1	18
7,62	20,5
9,14	22

Эти комплексные операции проводились на одной и той же установке, одной и той же бригадой рабочих. Поэтому полученные данные можно экстраполировать, чтобы определить время, затрачиваемое на одну такую операцию при глубине 12,2 км. Оно составляет 26—28 ч в предположении, что срок службы головок буров и другие параметры также изменяются линейно (согласно опубликованным в литературе данным, это предположение является ненадежным). Обычно бурильные трубы поднимают и спускают секциями общей длиной ~27,4 м, так что на длине ~300 м потребуется одиннадцать остановок и передвижений. Так как соединительные муфты действуют на стенки скважин, как поршень на цилиндр, то каждое динамическое воздействие на бурильную трубу неизбежно приводит к воздействию на всю скважину.

Было установлено, что скважины, бурение которых проводится в очень сжатые сроки, не только являются самыми дешевыми, но при этом возникает наименьшее число трудностей. Увеличение времени бурения часто приводит и к дополнительным трудностям, и к увеличению затрат. Поэтому одной из основных задач при глубоком бурении является сокращение времени бурения.

Зависимость между скоростью бурения и общим временем бурения. Имеется несколько способов повышения скорости бурения. Так, рабочие скорости бурения при использовании роторного и других методов в условиях пробного бурения в породах средней прочности составляют 10–60 м/ч. Даже при дроблении и других методах обеспечиваются скорости 3–9 м/ч (фиг. 2.13). В специальных испытаниях с помощью водяных струй удалось получить скорости бурения 15–85 м/ч (фиг. 2.14). В соответствии с классификацией буровых головок Американского нефтяного института эффективные скорости бурения составляют 40–210 м/ч, но даже при таких высоких скоростях бурения действительные эффективные скорости завершения скважин оказываются намного меньшими.



Фиг. 2.14. Бурение с помощью водяных струй [1, 4].

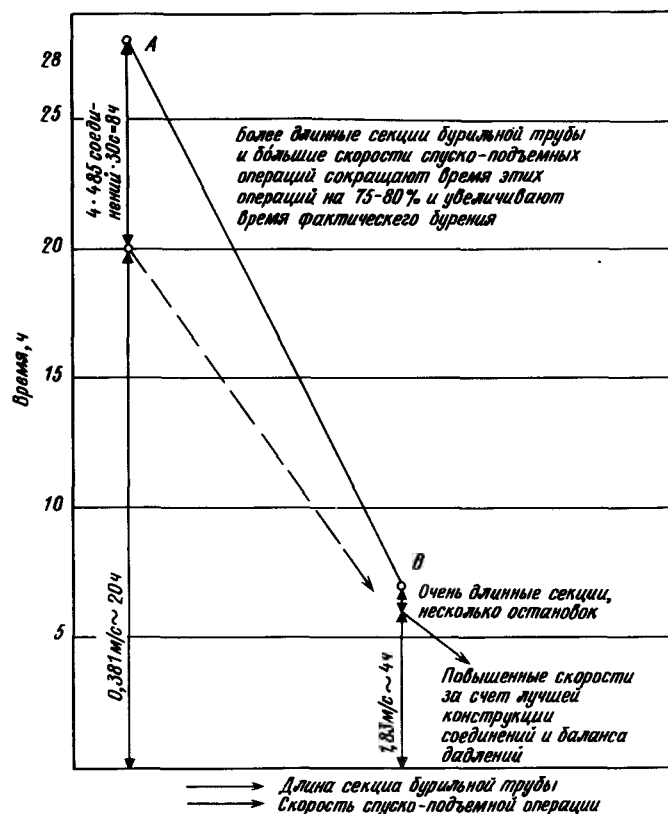
Время на бурение скважины Лоун-Стар в шт. Оклахома заняло 540 сут при средней скорости бурения 0,67 м/ч. Согласно некоторым оценкам, для завершения скважины глубиной 12–15 км потребуется 5–7 лет, а средняя скорость бурения при этом составит ~0,25 м/ч. Но если даже эта оценка является неточной, то все равно время бурения не может быть меньше половины указанного срока в зависимости от места для бурения. Совершенно очевидно, что при столь продолжительном бурении на столь большие глубины даже незначительное увеличение эффективной скорости бурения может привести к значительной экономии.

Секции бурильной трубы увеличенной длины ($n \cdot 305$ м). При глубоком бурении в океане длинные колонны бурильных труб могут быть подвешены к специально оборудованной платформе на корабле, и это позволит сократить время спуско-подъемной операции. При бурении на суше большие секции бурильной трубы могут быть подняты целиком лишь при условии, что буровая вышка достаточно высока; трубу можно сделать гибкой и наматывать ее на катушку; буровую вышку можно опустить в шахту, обеспечив доступ в забой человека или необходимого оборудования. Но до сих пор ни одно из этих предложений не было реализовано. Однако проблемы, связанные с весом столба бурового раствора, можно разрешить путем подбора соответствующей плотности этого раствора или с помощью механических средств.

Увеличение скорости спуска и подъема бурового инструмента зависит от порового давления, вязкости бурового раствора, конструкции соединительных муфт и других параметров, которые необходимо учитывать, чтобы избежать динамических возмущений, влияющих на устойчивость скважины.

Влияние уменьшения времени спуско-подъемной операции на общее время бурения показано на фиг. 2.15. При глубине 9,0 км на одну такую операцию требуется 22 ч, а при больших глубинах это время возрастает до 1–2 сут. Так как с ростом давления и температуры снижается срок службы буровых головок, то учащаются операции спуска и подъема инструмента. Поэтому при глубинах 12–15 км около 50% общего времени бурения будет затрачиваться на эти операции. Следовательно, усовершенствование методов спуска и подъема может оказаться самым решающим фактором в снижении общего времени бурения и соответствующих затрат. Однако из предложенных решений представлено на фиг. 2.15.

При глубине скважины 13,7 км на спуско-подъемную операцию можно было бы затрачивать ~28 ч при допущении о средней скорости дви-
9 Зак. 14650



Фиг. 2.15. Время спуско-подъемных операций бурового инструмента при глубине 13,7 км [1].

жения буровой трубы. Увеличивая длину секций трубы, можно уменьшить общее время, затрачиваемое на эту операцию. Использование секций труб длиной ~ 300 м (их можно использовать как при бурении в океане, применяя автоматическое соединение, так и в шахте) позволит сократить время подъема до 8 – 16 ч за счет сокращения времени на соединение и разъединение труб и обеспечения постоянных скоростей движения на длинах в несколько сот метров при условии, что проблемы, связанные с буровым раствором, решены. (Поддержание постоянной скорости движения может быть выгодным и для всей скважины.) Дополнительное сокращение времени спуско-подъемных операций можно обеспечить за счет увеличения самих скоростей дви-

жения. Были проведены расчеты для одной скважины при скоростях 0,3 – 1,8 м/с, а результирующие давления были представлены эквивалентным удельным весом бурового раствора.

Например, передвижение колонны труб длиной 13,7 км с очень небольшими остановками в течение 6 ч может происходить с постоянной скоростью 0,64 м/с. Но это время можно сократить до 5 ч, если применять лучшие конструкции соединительных муфт и поддерживать баланс между поровым давлением и напором бурового раствора. При этом можно сэкономить около 80% времени на спуско-подъемные операции, или 40% общего времени бурения. Если хотя бы часть этого сэкономленного времени превратить в активное время бурения, то общая производительность роторного бурения возрастет в 10 раз, доля времени фактического бурения от общего времени бурения увеличится от 2 до 20%, а скорость эффективного бурения от 0,6 до 6,0 м/ч. Причем рост указанных величин может произойти на базе современной технологии. Экономия средств при бурении только одной сверхглубокой скважины может составить при этом до 10 млн. долл.

При хорошо организованном бурении, продолжавшемся 228 суток и проведенном фирмой "Фалкон-сибод-дриллинг" по заказу фирмы "Амерада-Хесс" в графстве Виктория (шт. Техас), удалось достичь глубины 7,28 км в мягких и средней прочности достаточно нагретых породах, имеющих максимальную температуру ~ 270°C. Средняя скорость бурения составляла 1,31 м/ч, а распределение времени на различные операции приведено в табл. 2.6. Проведение бурения при высоких температурах потребовало применения охлажденного бурового раствора. Комбинация буровой вышки большой мощности и скважины большого диаметра может быть использована для увеличения эффективного времени бурения современной буровой установки в 10 раз и, следовательно, для снижения затрат и технических трудностей.

Буровые растворы. В настоящее время существуют две основные разновидности буровых растворов. Наиболее распространены растворы на водной основе. Однако во многих глубоких высокотемпературных скважинах используется жидкость на основе нефтяных компонентов благодаря ее стабильности при высоких температурах. Изучение буровых растворов ведется в трех основных исследовательских центрах фирм в Хьюстоне (шт. Техас), занимающихся их производством, а также в основных исследовательских центрах нефтяных фирм. Целью этих исследований является получение буровых растворов для работы в глубоких скважинах при температурах на забое более 370°C.

Основная трудность при использовании буровых растворов при высоких температурах связана с их способностью сгущаться или затвердевать на забое глубокой скважины при осуществлении операции подъема и спуска бурильного инструмента. Предложено несколько различных решений этой проблемы: новые устойчивые полимерные буровые растворы на водной основе, новые растворы на нефтяной основе, охлаждение буровых растворов на поверхности и ускорение спуско-подъемных операций.

Любой новый буровой раствор, предназначенный для работы на глубинах 12 – 15 км, должен стабилизировать диаметр скважины, удалять из нее обломки породы, поддерживать реологические условия для обеспечения наилучших гидравлических условий и быть устойчивым к загрязняющим веществам.

Роль буровых растворов, или буровых жидкостей, при глубоком бурении рассмотрена в работе [5]. Авторы этой работы являются сторонниками способов, обеспечивающих максимальную скорость бурения и снижение непроизводительного времени при бурении. В качестве буровых жидкостей с удельным весом $2,34 \text{ г/см}^3$, которые стабильны при температурах 400°C и выше, предлагается использовать взвеси тяжелых минералов в масляных жидкостях, стойких к таким высоким температурам. Масляные буровые растворы должны уменьшить коррозию бурильных труб и уменьшить вероятность разрушений под действием коррозии под напряжением.

Поровое давление на максимальной глубине может составлять 151 – 344 МПа, а температуры 260 – 538°C . Горные породы при таких условиях могут быть подвержены метаморфизму и перекристаллизации. Испытания с различными осадочными породами показывают, что снижение действующего напряжения (когда пластовое давление становится близким к литостатическому) и увеличение температуры приводит к снижению предела прочности пород [6]. (Кроме того, испытания на мраморе при повышенных температурах продемонстрировали определенное снижение предела прочности при температурах 300 – 500°C .) С ростом глубины более серьезной проблемой становится устойчивость буровой скважины. Породы становятся более мягкими, но в то же время и более вязкими, или тягучими, и их бурение усложняется.

Из-за продолжительных интервалов времени, в течение которых скважина не закреплена обсадкой, при глубоком бурении стало необходимым обращать особое внимание на проблемы, связанные с большими крутящими моментами и прихватом бурильных труб. Обе эти

проблемы связаны с качеством бурового раствора, но специальных измерений по определению оптимальных свойств растворов не проводилось. Для снижения крутящего момента в водных буровых растворах добавляют специальные смазки, эффективные при высоких давлениях.

В связи с опасностью прихвата, зависящего от разности между давлением бурового раствора и поровым давлением, а также от площади контакта и трения между бурильной трубой и стенками скважины, стали искать способы его предотвращения. Прежде всего была уменьшена площадь контакта между бурильной трубой и стенками скважины путем применения специальных колец стабилизаторов. Предложено использовать несколько добавок, снижающих трение между бурильной трубой и отжатым из водного бурового раствора осадком. Использование же масляных буровых растворов фактически устраняет проблемы, связанные с прихватом бурильных труб, поскольку отжатый осадок является достаточно тонким, а коэффициент трения между осадком и покрытой маслом сталью низок.

Особое внимание следует уделять коррозии бурильной трубы при глубоком бурении, так как это связано с трудностью ее извлечения из скважины. Коррозия протекает более интенсивно при высоких температурах. Причем коррозионное действие оказывают не только вещества, попадающие в буровой раствор из проходимых пород, но также и обычные компоненты водных буровых растворов, которые разлагаются при высоких температурах и становятся коррозионно-активными. Поэтому необходимо выполнять согласованную программу контроля и борьбы с коррозией бурильной трубы.

Температурные условия исключают возможность применения буровых растворов на водной основе при сверхглубоком бурении. Критическая температура для воды составляет $\sim 374^\circ\text{C}$. Реакция компонентов водных буровых растворов друг с другом и с компонентами проходимых пород снижает температурный предел использования таких растворов.

Вынужденный выбор неводной основы бурового раствора в определенной степени затрудняет поиск устойчивой жидкости для высокотемпературных смазок, гидравлических жидкостей и теплопередающих жидкостей. Такие жидкости относятся к классам ароматических или полифеноловых эфиров, ароматических или фосфатных эфиров, ароматических силикатов, силанов и силиконов и, возможно, некоторых нефтяных и парафиновых нефтей и галоидзамещенных углеводородных эфиров. Требуемые взвешивающее и герметизирующие

свойства могут быть обеспечены добавлением в высокотемпературные смазки сажи и гелей. Однако существующее оборудование непригодно для испытания таких консистенций в качестве буровых растворов, так что все сделанные предложения не имеют экспериментального подтверждения.

Цементы и цементирование. В настоящее время имеется оборудование для цементирования любой колонны обсадных труб при сверхглубоком бурении. Однако цементирующие материалы следует улучшать. Высокие температуры вызывают две значительные трудности при работе с существующими цементами. Первая заключается в том, что цемент быстро схватывается или затвердевает, еще не доходя до места. Вторая трудность, также связанная с высокими температурами, заключается в том, что цемент утрачивает свое основное качество — сопротивление сжатию, т.е. при высоких температурах понижается его прочность.

Пределы применения каротажного оборудования. Для выявления таких пределов очень интересными оказались результаты, полученные на скважине, пробуренной фирмой "Фалкон-сибод дрilling". На глубинах ниже 6,4 км все каротажное оборудование становилось неработоспособным из-за высоких температур, хотя определенные трудности возникали уже на глубине 4,6 км. Для устранения трудностей на глубинах ниже 3,66 км использовались изоляционные кабели, изготовленные из тефлона. На глубинах ниже 5,8 км, где регулирование температуры невозможно даже с помощью системы охлаждения буровым раствором, каротаж проводился только с помощью полностью теплоизолированных зондов.

Буровые растворы из специальных масляных эмульсий, использованные на такой глубине, ограничили выбор метода измерения лишь гамма-каротажем. Кроме приборов для каротажа, из-за высоких температур пришлось переделывать и приборы для контроля отклонений. Полагают, что наибольшая температура, достигнутая при бурении этой скважины, составляла 270°C, а трудности, связанные с измерениями скважинными зондами, стали значительными при температурах выше 204°C. Таким образом, необходимо совершенствование методов каротажа для проведения измерений в сверхглубоких скважинах, поскольку на каротаж отпускается все меньше времени, чтобы скважина максимально возможное время использовалась для бурения.

В табл. 2.7 приведена типичная рекомендуемая оптимальная программа при использовании различных буровых головок. Серии голо-

Таблица 2.7

Рекомендуемая оптимальная программа при использовании различных буровых головок [1]

Номер головок	Размер, мм	Серия головки	Достигнутая глубина, км	Проходка на головку, м	Время, ч	Скорость, м/ч	Вес, кг	Обороты, об/мин
2	241	1-1	1,89	670,6	16	41,12	18,1	180
3		1-1	2,38	487,7	15	38,5	18,1	150
4		1-2	2,53	152,4	10	15,24	15,9	150
5		1-1	2,71	182,9	13	13,71	18,1	140
6	241	1-1	2,85	137,2	11	12,19	13,6	140
7		1-1	2,96	106,7	11	9,75	13,6	130
8		1-1	3,13	121,9	10	12,19	18,1	100
9		5-2	3,38	304,8	60	4,88	15,9	50/55
10	241	5-2	3,69	304,8	60	4,88	15,9	50/55
11		5-2J	3,93	243,8	65	3,65	15,9	45/50
12		5-2J	4,11	182,9	65	2,74	15,9	45/50
13		5-2J	4,25	137,2	65	2,13	15,9	45/50
14		5-2J	4,35	137,2	65	2,13	15,9	45/50

вок соответствуют новой классификации Американского нефтяного института. Программа оптимального бурения "Амоко", созданная в течение почти десяти лет исследований и эксплуатации, может уменьшить риск капиталовложений в бурение скважин. Согласно результатам, полученным в полевых условиях, действительные затраты могут быть снижены на 15–20% при правильном применении такой программы.

Если необходимо оптимизировать процесс бурения скважины, то программу оптимального бурения можно получить на основе большого банка данных по бурению и геологии, накопленного при широкой разработке в США нефтяных месторождений.

Именно банк данных является опытной базой, на основе которой следует проводить оптимизацию бурения. Банк данных позволяет составлять для ЭВМ программу расчета и оптимизации почти всех основных переменных, определяющих процесс бурения данной скважины.

Из этого банка данных программа "Амоко" выбирает параметры скважины и условия бурения, наиболее близкие к проектируемой скважине. Выбранные данные затем вводятся в ЭВМ для составления предварительного плана бурения, содержащего наиболее эффективные и экономически выгодные методы, которые следует использовать при бурении данной скважины.

Программа дает набор таких переменных, как вес, приходящейся на буровую головку, скорость ее вращения, характеристики бурового раствора и тип головки. Следуя этому плану, можно сократить расходы и время бурения и тем самым значительно повысить его эффективность.

НАПРАВЛЕНИЯ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Целесообразно провести исследования по сплавам и головкам, изучить влияние высоких давлений и температур, рассмотреть возможность применения лазеров, освоить метод бурения с помощью высоконапорных струй и проходку двойных скважин, а также провести испытания в твердых породах.

Развитие геотермальной энергетики

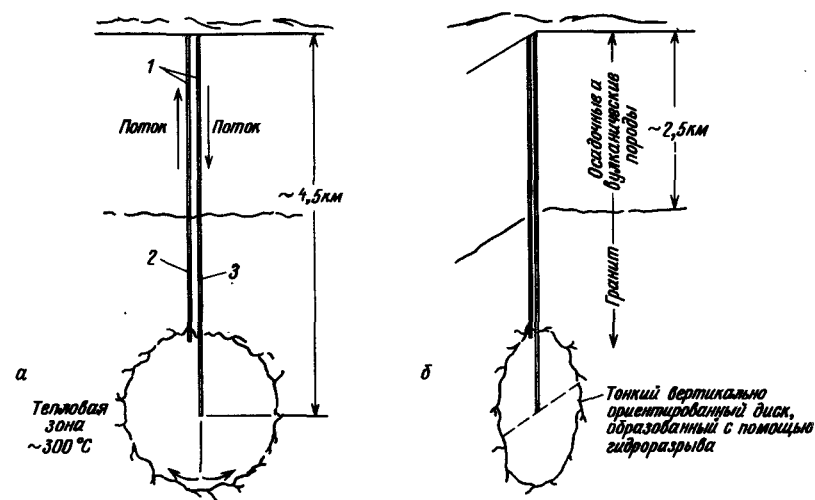
Обзор, касающийся вопросов развития геотермальной энергетики в прошлом, настоящем и, в определенной степени, в будущем, содержится в отчете [7]. Особое внимание в нем уделено вопросу бурения геотермальных скважин. Бурение таких скважин возможно с помощью существующего оборудования и методов, которые разработаны и опробованы в нефтяной и газовой промышленности, но затраты на создание таких скважин относительно велики.

Требуются более совершенные буровые станки и вспомогательное оборудование на поверхности, буровые головки и системы смазки подшипников головок, трубы, буровые растворы и цементы для работы при высоких температурах, аппаратура для каротажа и взятия проб по профилю скважин, оборудование для проведения направленного бурения применительно к условиям в геотермальной скважине. Необходимо также использование существующего банка данных для разработки оптимальных программ бурения геотермальных скважин.

Один из методов получения геотермальной энергии

В отчете [8], материалы которого составляют основу данного раздела, описан метод экономически выгодного извлечения геотермальной энергии, заключенной в большом числе участков с горячими породами, которые практически непроницаемы для циркулирующих подземных вод.

Предполагается, что источник промышленной энергии в соответствии с проектом Лос-Аламосской научно-исследовательской лабора-



Фиг. 2.16. Предложенная система освоения неглубокого сухого геотермального месторождения в качестве промышленного источника энергии [8].

1 — часть ствола скважины, укрепленная обсадными трубами, диаметр 340 мм
2 — часть ствола скважины, не укрепленная обсадными трубами, диаметр 305 мм, 3 — часть ствола скважины, укрепленная обсадными трубами, диаметр 244 мм.

тории, касающимся безводных (сухих) геотермальных месторождений (фиг. 2.16), будет осваиваться при следующей последовательности операций.

БУРЕНИЕ, СОЗДАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАЗРЫВА И ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЦИРКУЛЯЦИИ ВОДЫ

Выбор месторождения. Выбор подходящего участка или участков следует проводить в пределах региона с благоприятными геологическими условиями (отсутствие крупных тектонических нарушений или других неизвестных структурных сложностей и наличие по всей глубине предполагаемого месторождения подходящих горных пород), где тепловой поток достаточен для предполагаемой цели. Так как измеренные значения теплового потока практически постоянны на глубинах нескольких сот метров (независимо от того, ведутся ли изыскания нефти или геотермального пара), местоположение будущей

ГеоТЭС следует выбирать, исходя из топографии местности и доступа к ней, а не по изменениям теплового потока.

Тепловой поток изменяется от $6,3 \cdot 10^{-2}$ Вт/м² в восточной части США до $(12,5 - 25) \cdot 10^{-2}$ Вт/м² в западной части, а точнее в западной части восточных острогов Скалистых гор.

Бурение глубокой скважины. Первую, более глубокую, скважину следует бурить до планируемой глубины, а затем провести каротаж для определения геологических, стратиграфических, а также физических свойств пород месторождения и диагностических данных, которые включают измерение относительно невозмущенной температуры породы на забое скважины. Скважина затем должна быть закреплена обсадными стальными трубами до запланированной верхней границы месторождения, а обсадка зацементирована.

Создание гидравлического разрыва. После очистных операций, следующих за цементированием, должен быть осуществлен гидравлический разрыв в части скважины, которая расположена ниже укрепленного обсадными трубами участка и не имеет обсадки, с помощью методов, разработанных и используемых в нефтяной промышленности. Высоконапорный насос, установленный на поверхности, нагнетает воду вниз по линии высокого давления, проходящей в трубном пакере (уплотнителе), размещенном в кольцевом пространстве между этой линией и нижним концом колонны обсадных труб. Гидравлическое давление (превышающее гидростатический напор на ~ 48 МПа) будет действовать на породу, прилегающую к скважине, создавая в ней растягивающие напряжения, достаточные для образования трещин.

Напряжение, требуемое для увеличения трещины, намного меньше напряжения, необходимого для ее образования. Поэтому, если вокруг скважины уже произошел разрыв (растрескивание), то нагнетание жидкости следует продолжать при пониженном давлении до тех пор, пока трещины не распространятся до требуемого радиуса. Результаты расчетов хорошо согласуются с действительными данными, в соответствии с которыми образующаяся трещина должна быть по форме тонким вертикальным диском с эллиптическим поперечным сечением (фиг. 2.16).

После образования гидроразрыва создаются условия для временного смыкания системы трещин путем медленного понижения давления в системе за счет выпуска жидкости через клапан, регулирующий давление. Эта операция необходима для предотвращения возможного выброса больших количеств перегретой воды при пневматическом бурении второй, менее глубокой, скважины.

С помощью диагностических измерений, проводимых во время образования гидравлического разрыва, должно быть определено направление (азимут) образующейся трещины. Для таких измерений обычно используются датчики для измерения давления в скважине и геофоны, а также расположенные на поверхности сейсмометры и измерители углов наклона.

Бурение второй скважины. Вторую скважину следует располагать в нескольких десятках метров от первой (более глубокой) скважины по нормали к ориентации системы трещин на забое первой скважины. По существу размеры обеих скважин совпадают, и лишь глубина второй скважины на несколько сотен метров меньше. Ее следует бурить параллельно первой скважине до тех пор, пока она не достигнет верхней границы системы трещин. Затем она должна стать наклонной, чтобы пересечь эту систему, для чего должны быть использованы методы направленного бурения. Во время направленного бурения следует периодически повышать давление в системе с помощью более глубокой скважины для проверки сообщения между скважинами.

Завершение гидравлического разрыва. После обеспечения удовлетворительного сообщения между скважинами с помощью системы трещин (может потребоваться дополнительное создание трещин из забоя второй скважины) эта система должна быть расширена до своих конечных размеров путем дополнительного нагнетания жидкости через более глубокую скважину.

Циркуляция воды, находящейся под давлением. После окончания всех операций по образованию трещин вода из предварительно заполненной и находящейся под давлением системы на поверхности (включающей теплообменники, систему обработки воды, вентили и трубы) будет нагнетаться в образовавшийся контур и циркулировать в нем с помощью вспомогательного насоса. При циркуляции вода сначала будет опускаться по более глубокой скважине, проходить через систему трещин, подниматься по менее глубокой скважине и через регулирующий расход вентиль поступать в теплообменники и систему обработки воды, а затем отводиться в глубокую скважину.

После установления определенной средней разности температур нисходящего и восходящего потоков воды необходимость во вспомогательном циркуляционном насосе отпадает и его отключают. После этого циркуляция в системе будет поддерживаться за счет естественной конвекции. Следует, однако, отметить, что для систем в восточной части США разности температур ΔT невелики (например, температура воды на выходе из выводящей трубы составляет 150°C , а на

входе в нагнетательную трубу $\sim 40^\circ\text{C}$) и для обеспечения требуемого расхода может потребоваться вспомогательный насос.

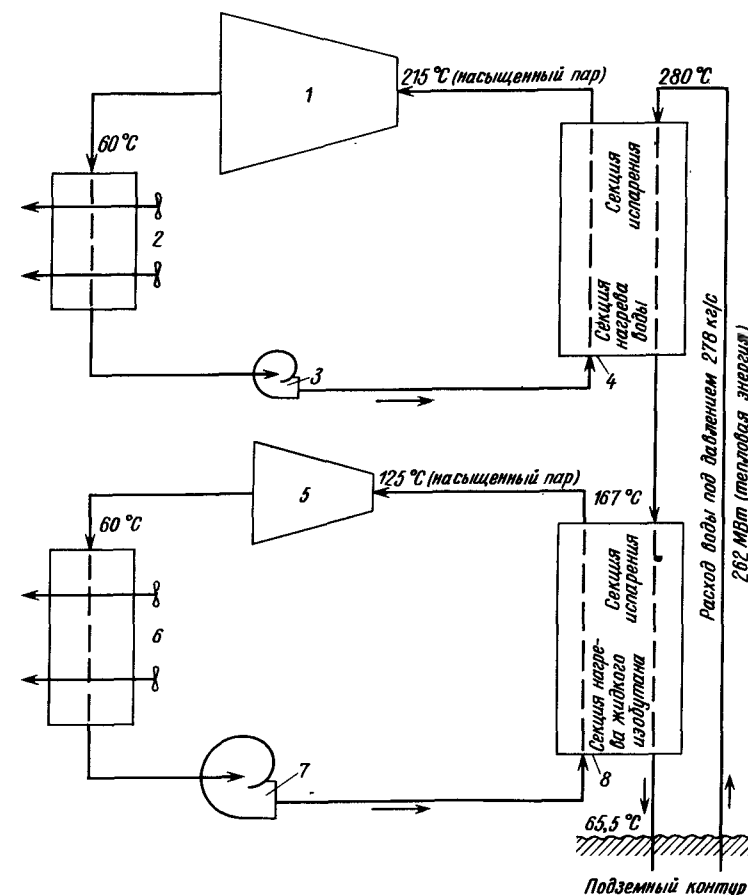
Если вода будет входить в подземную систему при температуре 65°C , а выходить из нее при 280°C , то разность плотностей воды в двух скважинах обеспечит разность давлений, достаточную для поддержания ее циркуляции под действием естественной конвекции с расходом $\sim 4,5$ кг/мин для размеров скважин, показанных на фиг. 2.16. Если же проницаемость сухой горячей породы в системе будет недостаточна для обеспечения такого расхода, то в теплообменниках придется поддерживать давление $\sim 13,8$ МПа, значительно превышающее давление паров воды при температуре 280°C , которое составляет $\sim 6,4$ МПа.

Такая разность давлений обеспечит циркуляцию воды во всей системе, которая по сравнению с паром обладает большим преимуществом при отборе тепловой энергии из тонких трещин в горячих породах. Кроме того, значительно увеличится расход теплоносителя и количества переносимого тепла при том же диаметре трубопровода. Это также позволит системе работать при повышенных температурах воды, которые могут иметь место при самопроизвольном распространении трещин в более нагретые породы.

ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННАЯ ГеоТЭС

Уже много лет тому назад стало ясно, что природные термальные воды являются уникальным источником энергии. Однако попыток использовать эти воды с малым теплосодержанием для производства электроэнергии не предпринималось. Лишь сравнительно недавно в связи с интересом, проявленным к ГеоТЭС с вторичным теплоносителем, и возможностью создания насосов, способных работать на забое скважин, ситуация изменилась. Общее требование ко всем предложенным или действующим в настоящее время геотермальным энергетическим системам с вторичным теплоносителем следующее: необходим большой перепад температур геотермальной циркулирующей воды, чтобы можно было испарить достаточное количество рабочей жидкости, циркулирующей в силовом цикле.

Преимущества кипящей при низкой температуре рабочей жидкости по сравнению с водой очевидны, особенно в том случае, когда температура поступающей из геотермального месторождения воды на поверхности не превышает 200°C . Именно такие температуры свойственны безводным (сухим) геотермальным месторождениям на востоке США.



Фиг. 2.17. Вариант системы с двойным циклом [8].

1 — паровая турбина мощностью 33,4 МВт, к.п.д. 85%; 2 — вентиляторы мощностью 0,71 МВт; 3 — насос мощностью 0,13 МВт; 4 — паровой котел; 5 — изобутановая турбина мощностью 22,3 МВт, к.п.д. 85%; 6 — вентиляторы мощностью 1,27 МВт; 7 — насос мощностью 2,87 МВт; 8 — изобутановый котел. Параметры парового цикла: расход 42,9 кг/с; мощность 32,6 МВт; общий к.п.д. $\eta = 29,8\%$. Параметры изобутанового цикла: расход 45,3 кг/с; мощность 18,1 МВт; общий к.п.д. $\eta = 11,9\%$. Общая мощность 50,7 МВт; общий к.п.д. 19,4%.

Для типичного искусственного источника геотермальной энергии в западной части США (фиг. 2.16) при температуре воды на поверхности земли 280°C наиболее подходящей энергетической системой является система с двойным циклом. Такая система с обычным

паровым циклом для более высоких температур теплоносителя и с изобутановым паровым циклом для более низких его температур показана на фиг. 2.17.

На западе США, где воды с такими температурами уже стали доступными, решено применять конденсаторы с принудительным воздушным охлаждением. Капитальные затраты при использовании такой установки оказываются на 10–20 долл./кВт выше обычных. Однако свобода выбора местоположения станции и отсутствие теплового загрязнения окружающей среды (сброс остаточного тепла может вызвать лишь нагревание воды в реках и водоемах) оправдывает такое решение. Экономические предпосылки для сооружения ГеоТЭС такого типа являются столь благоприятными, что дополнительное повышение стоимости производимой электроэнергии на $(0,2–0,4) \cdot 10^{-3}$ долл./кВт·ч, связанное с организацией воздушного охлаждения, может быть легко компенсировано.

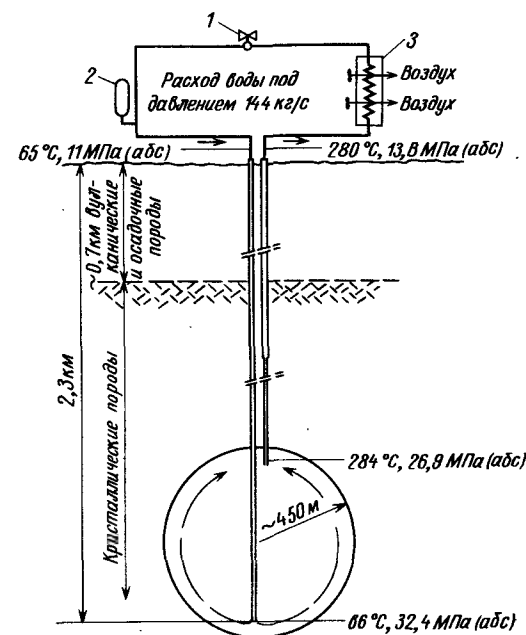
ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ВОЗМОЖНОСТИ СООРУЖЕНИЯ ГеоТЭС

Этот эксперимент предполагается провести в районе, расположенном на плоскогорье Хемес на севере центральной части шт. Нью-Мексико. Этот район, занимающий западные склоны гор Хемес и расположенный в 32 км от Лос-Аламоса, находится в пределах лесного заповедника Санта-Фе. Подробное геологическое и геофизическое изучение этого района в последние годы, а также бурение разведочной скважины до основных кристаллических пород в начале 70-х годов подтвердили целесообразность выбора этого места для проведения первого эксперимента.

Конфигурация предполагаемой экспериментальной системы и основные рабочие условия приведены на фиг. 2.18. Размер трещин (радиус ~450 м) и расход находящейся под давлением воды (144 кг/с) выбраны в предположении, что искусственное геотермальное месторождение истощилось бы менее, чем за год, если бы оно не увеличивалось за счет дополнительного образования трещин под действием термических напряжений.

ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАЗРЫВ И РОСТ ТРЕЩИН ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТЕРМИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Гидравлический разрыв — хорошо известный метод стимулирования, широко используемый на нефтяных и газовых месторождениях для улучшения их характеристик путем создания множества трещин в



Фиг. 2.18. Схема экспериментальной системы и рабочие условия [8].
1 — регулирующий клапан; 2 — устройство для поддержания давления; 3 — теплообменник мощностью 150 МВт.

продуктивном образовании, примыкающем к стволу скважины. Для этого выше и ниже зоны, в которой предполагается создать систему трещин, устанавливают герметичные уплотнения и используют высоконапорный насос на поверхности и линию высокого давления, проходящую через верхнее уплотнение. Насос создает (обычно с помощью воды) в изолированной зоне гидравлическое давление, превышающее существующее гидростатическое давление на величину до ~50 МПа. Образуемая система трещин может распространяться от ствола скважины на десятки метров, причем увеличение объема происходит также за счет местной естественной пористости и благодаря упругому сжатию нетреснутой породы.

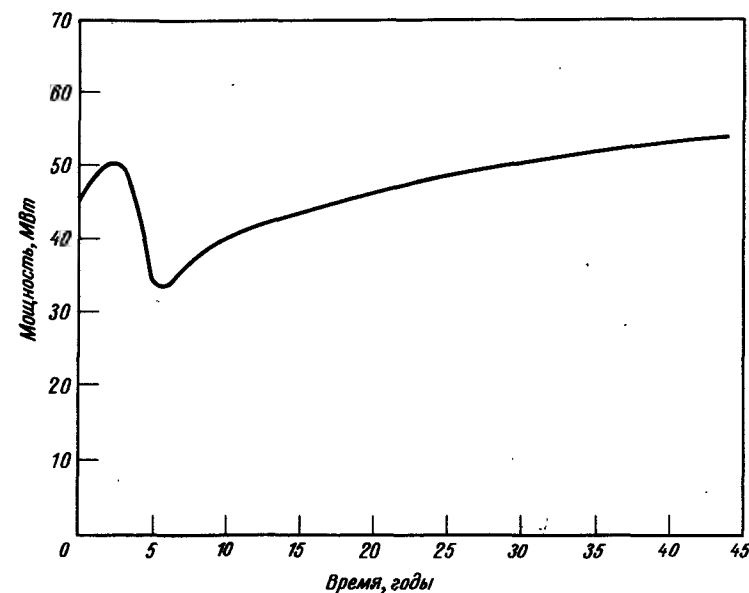
Хотя не существует каких-либо ограничений по глубине, гидравлический разрыв обычно производится только в осадочных породах. Однако прочность и упругость некоторых осадочных образований, в которых были удачно созданы трещины, очень близки по своим зна-

чениям к соответствующим характеристикам пород магматического происхождения.

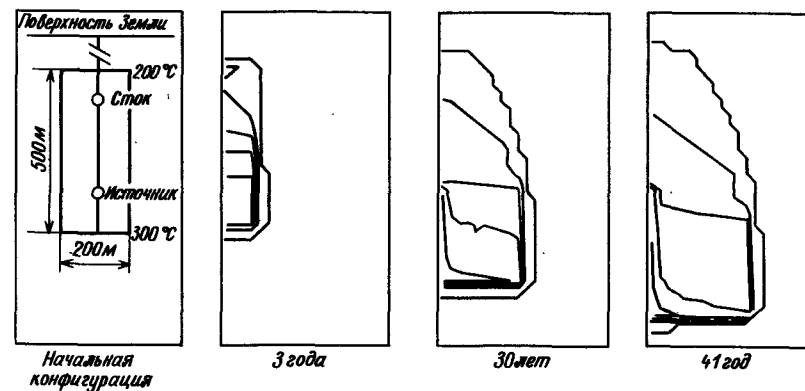
Например, в работе [9] описан гидравлический разрыв в формации Элленбургера (запад шт. Техас) на глубинах 3,66 – 4,57 км, состоящей из прочного плотного доломитового известняка, свойства которого очень напоминают свойства гранита. Теория и практика гидравлического разрыва в настоящее время хорошо разработаны. По мнению представителей двух американских промышленных фирм, специализирующихся в работах по гидравлическим разрывам, создание соответствующих систем для извлечения геотермальной энергии не представляет каких-либо трудностей и может быть выполнено с помощью разработанных методов. Причем, используя гидравлический разрыв, можно получить большие поверхности теплообмена даже в очень твердых и прочных породах. Возможность создания таких систем уже доказана, а стоимость относительно невысока.

Извлечение тепла из пород, подверженных гидравлическому разрыву, может вызвать термические напряжения, достаточные для обеспечения развития первоначальной системы трещин, которые распространяются далеко за пределы охлажденной области. При этом возрастут как размеры поверхности теплообмена, так и общее количество тепла, которое передается жидкости, циркулирующей в системе трещин.

Такое дополнительное увеличение энергии при использовании рассматриваемого метода было подтверждено расчетами на ЭВМ [10]. Расчеты показали, что объем новых трещин, возникающих под действием термических напряжений, и увеличение поверхности теплообмена приведут по истечении начального периода извлечения тепла из системы к передаче дополнительного тепла к циркулирующей жидкости. Результаты расчетов для конкретной системы приведены на фиг. 2.19 и 2.20. В этих расчетах размеры трещин, возникающих под действием термических напряжений, принимались равными 50 мм. На фиг. 2.19 показано изменение извлекаемой мощности во времени. Хорошо видно восстановление мощности, о котором только что говорилось. На фиг. 2.20 приведены контуры постоянной пористости для ряда произвольно выбранных значений времени. Видно, что объем месторождения с течением времени возрастает как в глубину от основной системы, так и в стороны.



Фиг. 2.19. Изменение мощности во времени при постоянном расходе циркулирующей жидкости.



Фиг. 2.20. Контуры одинаковой пористости, определенные с помощью расчетов на ЭВМ.

ЭКОНОМИКА

С экономической точки зрения система производства электроэнергии, основанная на Лос-Аламоссском проекте освоения сухих (безводных) геотермальных месторождений, уже в настоящее время представляется перспективной, а в будущем ее создание может стать еще более целесообразным. Это подтверждается тем, что единственными затратами "на топливо" в такой искусственной геотермальной системе являются эксплуатационные расходы, тогда как стоимость топлива на обычных тепловых электростанциях (на ископаемых топливах или атомных) непрерывно возрастает. Это особенно касается ТЭС, работающих на нефти или газе.

Около 50–60% капитальных затрат на ГеоТЭС по Лос-Аламоссскому проекту приходится на операции бурения, крепления скважин обсадными трубами и гидроразрыва, необходимые для получения достаточно большого теплового резервуара. Так как затраты на бурение и обсадку скважин обычных размеров хорошо известны, то выполнение соответствующих оценок суммарных капитальных затрат для такой ГеоТЭС облегчается.

В табл. 2.8 сравниваются данные по стоимости для ГеоТЭС по Лос-Аламоссскому проекту и для обычных атомной и тепловой электростанций на угле.

Таблица 2.8

Сравнение стоимостей электростанций
и вырабатываемой электрической энергии [8]

Тип станции	Мощность станции, МВт	Стоимость станции, долл./кВт	Стоимость вырабатываемой энергии, 10 ⁻³ долл./кВт·ч
"Сухой" источник геотермальной энергии			
Порода, 300°С; двойной цикл, 4 скважины	100	186	4,7
Порода, 175°С; изобутан, 10 скважин	100	316	8,0
Нью-Йорк, середина 1970 г.			
Атомная станция	950	350	11,8
ТЭС на угле	950	250	13,3
Основание: ежегодные начисления 0,17, коэффициент использования 80%.			

Данные по эксперименту, касающемуся создания искусственного геотермального месторождения и ГеоТЭС

Данные, относящиеся к рассмотренному выше эксперименту, приведены в отчете [11] и излагаются далее. На основании собранных до сих пор геологических данных и измерений теплового потока, проведенных в нескольких специально пробуренных для этой цели скважинах, выбрано место проведения эксперимента. Как указывалось, оно расположено в горах Хемес в 3–9 км западнее Валлес-Кальдеры и в ~50 км на запад от Лос-Аламоссской научно-исследовательской лаборатории и представляется наиболее подходящим для эксперимента по созданию искусственного месторождения. Геологические условия здесь достаточно просты, глубина до основания, сложенного гранитами, составляет всего ~760 м, а геотермический градиент в 6–10 раз больше нормального. Пробуренная здесь разведочная скважина с обсадкой до глубины 740 м использовалась для изучения тепловых потоков, гидрогеологии и проблем, связанных с бурением.

Предполагается продолжить бурение на несколько десятков метров в гранит при непрерывном отборе проб с целью изучения характеристик и прочности гранита, а также измерения температур и тепловых потоков в нем для определения возможности проведения экспериментов по гидравлическому разрыву и созданию в системе давления. Если порода основания будет в состоянии поддерживать постоянное давление в системе, то после этого будет выбрано точное место размещения опытной подземной циркуляционной системы.

Предварительные измерения тепловых потоков в этом районе показали, что на глубине всего ~2,3 км температуры пород могут составлять ~260–315°С, что не удивительно для районов с породами, образовавшимися в результате недавнего вулканизма. Именно на такой глубине предполагается создание циркуляционного контура типа показанного на фиг. 2.16, б с помощью сравнительно небольшого гидроразрыва с образованием полости радиусом ~450 м. Сброс тепла после ГеоТЭС будет производиться в атмосферу с помощью теплообменников с воздушным охлаждением.

Уже само создание такой системы и организация в контуре циркуляции под действием естественной конвекции очень важны, поскольку они продемонстрируют принципиальную возможность использования искусственного геотермального месторождения. Предполагается использование контура в течение 10 мес. Причем, начальная поверхность теплообмена будет весьма малой. Это позволит выяснить, бу-

дет ли система истощаться или благодаря образующимся под действием термических напряжений трещинам станет самовосстанавливающейся. Поддержание циркуляции в течение 2–3 лет позволит провести подробное изучение термического, химического и механического поведения системы, а также ее экономики. Естественно ожидать таких трудностей, как утечка жидкости через систему естественных пор в породе или закупорка циркуляционных каналов отложениями минеральных солей. Однако для этих проблем можно найти инженерные решения.

Использование на месторождении неводных жидкостей

Патент [12] содержит описание метода нагрева неводной жидкости в сухом (безводном) геотермальном месторождении. Метод состоит в инжектировании в месторождение неводной жидкости через специальную скважину, ее нагревании в недрах месторождения и извлечении через продуктивную скважину при условии, что температура породы в месторождении существенно выше температуры инжектируемой жидкости.

Нагретая жидкость из продуктивной скважины должна затем поступить в нагреватель или теплообменник, где она передает тепло или испаряет вторую жидкость, являющуюся рабочей. Рабочей жидкостью могут быть вода, пар, изобутан, пентан, изопентан, этиловый спирт, керосин или сырая нефть. Кроме того, жидкость извлекаемая из продуктивной скважины, может сама непосредственно использоваться для подогрева или в качестве поступающего в реактор теплоносителя, а если это пар, то для работы турбины и т.д.

Рабочую жидкость, которая на выходе из теплообменника может быть паром, жидкостью или парожидкостной смесью, можно использовать самым различным образом, например для увеличения паросодержания, испарения, для нагревания (химического или биологического) реактора, или для предварительного нагревания поступающих в него теплоносителей. Кроме того, нагретую рабочую жидкость можно использовать в сельском хозяйстве для обогрева полей и грядок или для обогрева теплиц. Это позволит значительно повысить урожай в тех районах, где летний сезон короток. При этом исключаются опасность и последствия заморозков и промерзания почвы.

После непосредственного использования жидкости из продуктивной скважины для работы турбины или в какой-либо теплообменной установке желательно вновь закачать ее в то же месторождение через инжекционную скважину для повторного нагрева. Но можно также

использовать ее в других процессах, а в месторождение подавать неиспользованную неводную жидкость.

Предложенный метод имеет ряд преимуществ по сравнению с другими известными методами использования геотермальной энергии. Это связано с тем, что нагретая неводная жидкость на выходе из продуктивной скважины содержит малое количество растворенных солей, и поэтому не возникает проблемы удаления рассола. Кроме того, вредные газы, выделяющиеся в процессе парообразования при использовании жидкостей из геотермальных месторождений, в данном случае практически отсутствуют.

Литература

1. Patterson S.O., Sabels B.E., Kooharian A., Ultra-deep drilling for Geothermals, Tetra-Tech. Inc., AD-774 108, December 1973.
2. Banwell J., Meidar T., Geothermal Energy for the Future, A Paper Presented at 138th Annual Meeting of the American Association for the Advancement of Science, Philadelphia, 1971.
3. Deep Hole Drilling Feasibility Study, Fenix and Scisson Inc., Tulsa, Oklahoma, May 1969.
4. Mauer W.C., Heilhecker J.K., Love W.W., High Pressure Jet Drilling, SPE-3988, Society of Petroleum Engineers, AIME, 1972.
5. Gray G.R., Young F.S., Drilling Fluids of Deep Wells in the United States, Proc. 8th World Petroleum Congress, 1971.
6. Handin J. et al., *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 47, No. 5, 717–755 (1963).
7. Altseimer J.H., Geothermal Well Technology and Potential Applications of Subterranean Devices, A Status Review LA-5689-MS, p. 34, August 1974.
8. Brown D.W., Smith M.C., Potter R.M., A New Method for Extracting Energy from "Dry" Geothermal Reservoirs, LADC-72-1157, Sept. 1972.
9. The Frac Book, Design/Data Manual for Hydraulic Fracturing, Halliburton Services, Duncan, Oklahoma, 1971.
10. Harlow F.H., Pracht W.E., A Theoretical Study of Geothermal Energy Extraction, *J. Geophys. Res.* (December 1972).
11. Aamodt R.L., Smith M.C., The Induction and Growth of Fractures in Hot Rock: Artificial Geothermal Reservoirs, LADC-72 669, The University of California's Los Alamos Scientific Laboratory, 1972.
12. Paull P.L., Kerr P.F., US Patent 3, 827, 243, August 1974.

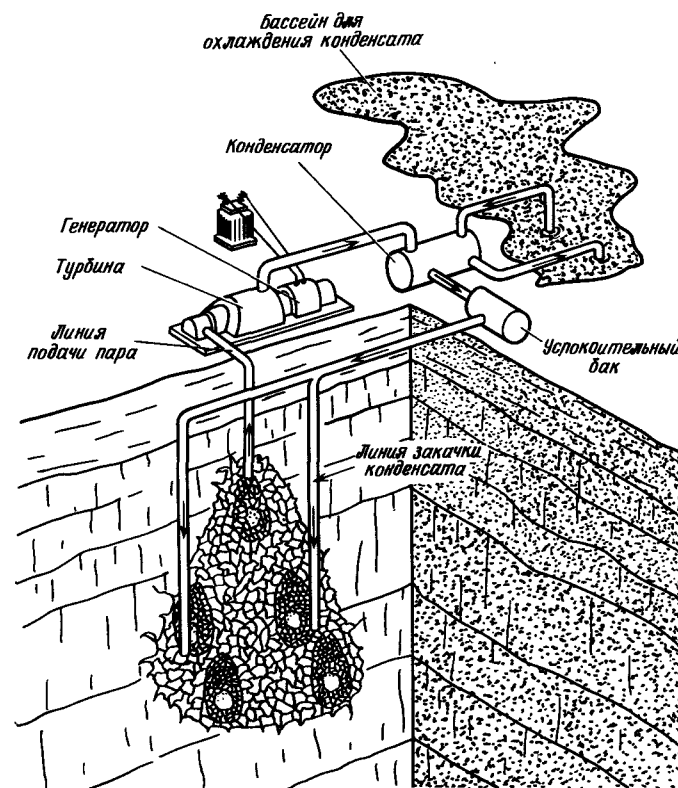
ПЛОУШЕРСКАЯ ПРОГРАММА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ

В программе исследований, имевшей целью изучить реальные возможности создания Плоушерской ГеоТЭС [1], изучаются факторы, связанные с непосредственным извлечением тепла из горячей породы с применением ядерных зарядов для растрескивания этой породы. Ниже представлены результаты этих исследований, которые проводились совместно фирмой "Америкэн ойл шейл" и Комиссией по атомной энергии. Фирмы "Баттель – Нордвест" и "Вестингауз" оказали помощь фирме "Америкэн ойл шейл" при выполнении ее части работы, в то время как Комиссия по атомной энергии передала свою часть работы Лоуренсиейской радиационной лаборатории и фирме "Невада оперейшн оффис".

Плоушерская программа извлечения геотермального тепла

Природный пар получают путем бурения скважин в районе подземного бассейна с паром или горячей водой, находящейся под давлением. Горячая вода или пар размещается под перекрывающим достаточно непроницаемым чехлом породы и получает тепло за счет циркуляции через глубоко залегающий источник тепла. Таким источником тепла может быть относительно неглубоко залегающая масса нагретых магматических пород, недавно потухший или действующий вулкан. Если в таком районе пробурить скважину, то на поверхность земли можно вывести пар. Если этого пара достаточно и если он приемлемой чистоты, то его можно использовать для выработки электроэнергии.

С другой стороны, даже при наличии источника тепла система циркуляции может не обеспечить вывод требуемого количества пара на поверхность земли. Плоушерская программа предусматривает из-



Ф и г. 3.1. Принципиальная схема установки для извлечения геотермального тепла по Плоушерской программе [1].

влечение геотермального тепла непосредственно из блока нагретых пород. Плоушерская программа основана на использовании ядерного взрыва для дробления больших объемов горячей породы. Тепло из трещиноватой породы извлекается путем закачивания в нее воды, превращающейся в пар, который затем подается в турбогенератор (фиг. 3.1). Система является замкнутой, поскольку конденсат снова возвращается в раздробленную породу.

Источник тепла должен залегать достаточно глубоко, чтобы даже при очень мощных взрывах на поверхности не наблюдалось следов

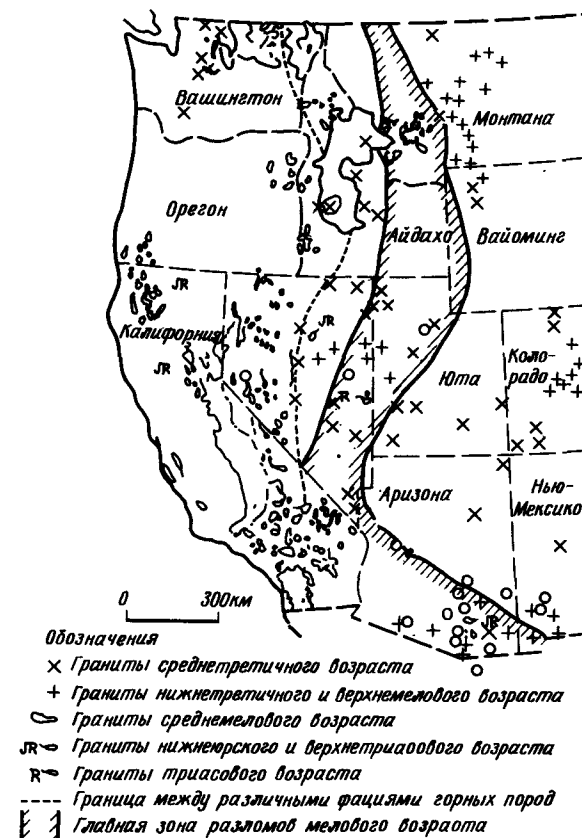
разрушения. Значительная часть радиоактивности, вызванной ядерным взрывом, будет локализована непосредственно вблизи места взрыва. Кроме того, благодаря замкнутости цикла системы будет исключено присутствие радиоактивных веществ в паре, извлекаемом на поверхность земли.

Тепловая энергия, заключенная в $\sim 4 \text{ км}^3$ породы, чрезвычайно велика. Если это количество породы имеет начальную температуру 350°C и охлаждается до 177°C , как это предполагалось для описанной здесь электростанции, то извлеченная тепловая энергия будет эквивалентна тепловой энергии, выделяющейся при сжигании $\sim 48 \text{ млн. т}$ нефти. Таким образом, при достаточно высоком к.п.д. преобразования этой энергии можно было бы выработать десятки тысяч мегаватт электроэнергии. Реализация такого источника энергии будет зависеть от стоимости разрушения породы, эффективности процесса извлечения тепла и от качества полученного таким образом пара.

Извлечение тепла с применением ядерных взрывов целесообразно в двух различных по геологическим характеристикам ситуациях. В первом случае геотермальное месторождение пара не обладает достаточной проницаемостью для обеспечения требуемого расхода пара через обычные скважины. Большой диаметр скважины, который получается с помощью ядерных зарядов, мог бы позволить настолько увеличить производительность пара, что стала бы возможной экономически выгодная разработка как ныне нерентабельных месторождений пара, так и тех районов, разработка которых обычными методами считается невозможной. Эта идея нашла воплощение в программе, известной под названием Плушерской программы стимулирования геотермального месторождения.

Во втором случае на средней глубине ($\sim 3 \text{ км}$) может залегать горячая ($\sim 350^\circ \text{C}$) относительно сухая порода. Базальтовая магма, обладающая малой вязкостью, либо образует относительно тонкие интрузивные тела, либо изливается в виде лавовых потоков. В то же время гранитная магма, обладающая большой вязкостью, образует плутоны типа пробок. Твердые, но еще горячие интрузии гранитной породы, залегающие близко к поверхности земли, являются, по-видимому, подходящим объектом для сухого геотермального источника.

На западе Соединенных Штатов Америки объем гранитных пород, которые внедрялись за период от 110 до 800 млн. лет тому назад, в несколько сотен раз превосходит объем пород, внедрившихся за время после этого периода. Обнаружено много крупных относительно моло-



Ф и г. 3.2. Гранитные породы мезозойской и кайнозойской эпох, распространенные на западе США [1].

дых интрузий, которые образуют широкую полосу, идущую с севера на юг через западную часть шт. Юта и восточную часть шт. Невада (фиг. 3.2) (данные о возрасте интрузий, приведенные на этой фигуре, основаны частично на радиометрических данных, опубликованных до июля 1962 г.).

Джилали отмечает непрерывный характер процесса магматической деятельности, в ходе которого менялся только объем внедренно-

го материала [2]. Таким образом, можно ожидать, что западное континентального водораздела в последние 2 — 3 млн. лет образовалось значительное количество гранитных интрузий.

Настоящее исследование предпринято с целью определения технических и экономических проблем, а также проблем безопасности и воздействия на окружающую среду и, наконец, административных проблем, связанных с использованием Плушерских геотермальных электростанций для производства электроэнергии. Дополнительная цель данной работы заключается в подборе данных и составлении рекомендаций для дальнейшей разработки программы.

В основу проекта заложены следующие предположения:

Мощность электростанции	200 МВт
Геотермические градиенты	125 и 100 °С/км (геотермический градиент месторождения Серро-Прието соответствует последнему)
Геологические условия	Достаточно мощный гранитный массив, перекрытый 300-метровым слоем адлювия, лавы и (или) осадочной породы
Температура породы	350 °С
Мощность заряда	200, 500 и 1000 кт
Паровая система	Кипящая, или перегретая вода под давлением

Предполагается также, что породы геотермального месторождения являются непроницаемыми и безводными (сухими) и что с увеличением проницаемости пород увеличится теплопроизводительность месторождения.

В данном исследовании обсуждаются три различных варианта ГеоТЭС. Они отличаются способом защиты электростанции от сейсмических смещений, вызываемых разрушающими породу взрывами. В качестве основного варианта рассматриваются электростанция мощностью 200 МВт, работающая с использованием цикла с кипящей водой, и геотермальное поле, полностью подготовленное до строительства электростанции. Это означает, что при сооружении электростанции и соответствующего оборудования можно отказаться от требования сейсмостойкости к толчкам, вызванным последующими взрывами.

В другом варианте предусматривается создание сейсмостойкой электростанции и не требуется окончательной подготовки геотермаль-

ного поля до окончания сооружения станции, что является явным экономическим преимуществом. Недостатком этого метода являются дополнительные капитальные затраты на усиление конструкций электростанции и дополнительные потери тепла, связанные с транспортировкой пара на относительно большие расстояния. Например, с помощью взрыва можно было бы создать поле, способное производить тепло в течение 10 лет, и построить сейсмостойкую электростанцию. По истечении 10 лет с помощью нового взрыва можно было бы ввести в действие новое поле на достаточно удаленном расстоянии, чтобы повреждения действующей электростанции были минимальными. Второе поле придется соединить с электростанцией проходящим по поверхности длинным сейсмостойким трубопроводом. Еще через 10 лет с помощью нового взрыва можно было бы создать третье поле недалеко от второго, которое можно соединить с сейсмостойким трубопроводом при помощи обычного, неусиленного участка трубопровода.

В соответствии с третьим вариантом электростанция перемещается каждый раз на период взрыва. После завершения взрывных работ производство энергии возобновляется: электростанция возвращается на прежнее место, паропровод и линия электропередачи восстанавливаются. Хотя данный метод кажется достаточно простым, на практике для его реализации требуется перемещение больших блоков оборудования. Для решения этой задачи можно воспользоваться, например, железнодорожными вагонами, буксировщиками, вертолетами или тягачами. Чтобы эти технические средства могли быть использованы, электростанция должна состоять из компактных модулей. Можно использовать также баржу и водный путь. В этом случае электростанция полностью монтируется на барже в канале, проведенном от поля, где должно производиться дробление породы, до некоторого достаточно удаленного места, в котором безопасность станции гарантирована. Во время проведения ядерных взрывов электростанция будет выводиться в это место. При подходящем рельефе местности, этот метод, вероятно, окажется экономически самым выгодным.

Требования к площадке и геологические условия

Идеальным участком для геотермальной электростанции является малонаселенная местность, поскольку экономическая выгода программы увеличивается с ростом мощности зарядов. В свою очередь допустимая мощность заряда определяется количеством и типом объ-

Таблица 3.1

Приближенные тепловые данные для гранитных интрузий [1]	
Температура интрузии, °C	700
Конечная температура затвердевания, °C	500
Скрытая теплота плавления, кДж/кг	336
Теплопроводность (жидкости и твердого тела), Вт/(м·К)	2,09
Удельная теплоемкость (жидкости и твердого тела), кДж/(кг·град)	1,17
Плотность (жидкости и твердого тела), кг/м ³	2700

ектов, расположенных вблизи площадки. Кроме того, площадка должна быть сейсмостойкой и представлять собой достаточно ровное место с мягким грунтом; на котором нетрудно создать бассейн для охлаждения конденсата, проложить, если надо, канал и построить градирию.

Следующим требованием является возможность получения достаточного количества воды (с поверхности или горизонта грунтовых вод) с расходом более 3,5 м³/мин. Кроме того, неподалеку должна проходить линия электропередачи, чтобы можно было снизить стоимость передачи электроэнергии. И наконец, источник тепла должен находиться на глубине 1500 – 3000 м.

Подходящим источником тепла является твердая, но тем не менее горячая интрузия гранитной породы, залегающая близко к поверхности. Используя разумные аппроксимации (табл. 3.1) и пренебрегая конвекцией или выделением газов, Джегер [3] показал, что отвердевание гранитной интрузии происходит в течение $0,016 T^2$ лет, где T – толщина интрузии в метрах.

Для толщин в 1, 2 и 3 км время отвердевания составляет 0,2, 0,6 и 1,4 млн. лет соответственно. В эти периоды происходит затвердевание ядра (500 °C) и температуры, превышающие 350 °C, поддерживаются на расстоянии от ядра, примерно равном толщине интрузии. По мере охлаждения центра интрузии температура плутона и окружающей его породы остается выше 350 °C в течение времени, в несколько раз превышающего период первоначального отвердевания.

По-видимому, ряд гранитных интрузий образовался в западной части континента в последние 2 – 3 млн. лет. Хорошо изученным примером таких интрузий является Корнельский кварцевомонцитный плутон вблизи Ахо (шт. Аризона). Этот плутон, относящийся к третичному периоду, выходит на поверхность на площади более 230 км² в Малых горах Ахо.

По оценкам Джилали [4], температура кристаллизации этого плутона 800 °C, а глубина его залегания ~ 2 км. Такие температура и глубина залегания соответствуют условиям, необходимым для гидротермальных преобразований, которые имели место при остывании магмы. По-видимому, большинство плутонов третичного периода, в частности состоящие из порфириновых текстур, залегают на глубине 2 – 4 км. Трудность заключается в обнаружении еще горячих магматических тел на таких глубинах.

В ходе разведки порфиристо-медных месторождений был разработан метод обнаружения скрытых рудных тел. После выбора геологического района поиска проводятся аэромагнитные и региональные гравитационные измерения, чтобы определить площадки для более подробного исследования магнито-теллурическим и локальным гравитационным методами. В изученных геотермальных месторождениях пара источники тепла связаны с гравитационной и магнитной аномалиями. При определении геотермальных аномалий также могут быть эффективными микросейсмические измерения.

О существовании глубоко залегающих сухих источников тепла могут свидетельствовать аномальные тепловые потоки и высокие геотермальные градиенты вблизи поверхности Земли, однако эти условия не всегда являются необходимыми. О более поздних интрузиях в большей степени могут свидетельствовать недавние поверхностные смещения и локальные геологические изменения.

Хотя геотермальные источники могут и не содержать значительных количеств минеральных веществ, но по мере охлаждения они выделяют следы многих элементов. Таким образом могут быть обнаружены как химические, так и физические проявления глубоко залегающих плутонов. Дисперсия ртути распространяется на огромное расстояние, и поэтому следы ртути могут быть обнаружены раньше, чем аномальные количества чаще встречающихся элементов.

Разработка источников тепла

Разрушенная ядерным взрывом нагретая порода является не просто источником энергии. По аналогии с ядерным реактором здесь имеются активная зона, топливо, удерживающая оболочка и насосы. Техническая и экономическая осуществимость проекта в значительной мере зависит от эффективности получения пара в зоне растрескивания.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЯДЕРНОГО ВЗРЫВА

Ядерный взрыв в породе происходит следующим образом: при высвобождении энергии в процессе ядерной реакции образуется плазма с температурой в миллионы градусов и давлением выше 100 ГПа. Тепловая энергия генерирует ударную волну, которая испаряет, плавит и разрушает окружающую породу, и только на сравнительно большом расстоянии от места взрыва превращается в сейсмическую волну. Образовавшийся под действием ударной волны сферический объем испарившейся породы будет расширяться до тех пор, пока давление внутри сферы не будет сбалансировано весом лежащей выше породы и напряжением в окружающей породе. В результате получается большая сферическая полость, окруженная расплавленной и растрескавшейся породой.

Порода, разрушенная над полостью, как правило, оседает в течение периода времени от нескольких секунд до нескольких часов после взрыва (за исключением некоторых материалов, таких, как соль, в которых полость сохраняется). Во время обвала полость, как таковая исчезает, а ее объем распределяется в трещиноватой породе, расположенной выше точки взрыва. В легко разрушаемой породе типа аллювия процесс осадки может продолжаться до тех пор, пока не достигнет поверхности с образованием кратера. В твердой породе осадка продолжается до образования устойчивого свода. Вся структура в целом называется трубообразной полостью, или трубой.

Ниже приводятся оценки результатов ядерных взрывов в условиях, представляющих интерес для геотермальных разработок.

Размер полости. Радиус полости r_c определяется по следующей формуле:

$$r_c = c \frac{W^{1/3}}{P_f^\alpha}, \quad (3.1)$$

где W — мощность заряда; P_f — конечное давление в полости в конце роста полости; c и α — константы. Это давление связано с давлением перекрывающих пород соотношением

$$P_f = KP_0, \quad (3.2)$$

где K — константа, а P_0 — начальное давление в полости. Константы c и α определяются теоретическими расчетами для адиабатического расширения системы кремнезем — вода, а K определяется с помощью

данных, полученных в ходе ядерных испытаний. Для r_c в метрах, W в килотоннах и P_0 в барах (10^5 Па) эти константы примерно следующие: $C = 46,6$, $\alpha = 0,277$ и $K = 2,0$, но до некоторой степени они зависят от изменения давления P_0 .

В реальных экспериментах при измерении r_c и W возникает некоторая ошибка. В табл. 3.2 результаты экспериментов в гранитной породе сравниваются с результатами расчетов по формуле (3.1). Неточность в 0,5 м, полученная при определении радиусов полости в случаях взрыва устройств "Пайлдрайвер" и "Хардхэт", правдоподобна, но та же самая неточность в случае взрыва устройства "Шоул", по всей вероятности, занижена, хотя неизвестно насколько.

Приведенные данные следует дополнить результатами 13 подземных ядерных экспериментов, проведенных Францией на полигоне Хоггар в пустыне Сахара. Эти эксперименты были проведены в однородной гранитной породе, которая, очевидно, тверже, суше и имеет меньшую естественную трещиноватость, нежели гранитная порода в США. Измеренные в опытах французов радиусы полости существенно меньше, чем в американских экспериментах, причем их отношение равно

$$\frac{r_{c \text{ амер}}}{r_{c \text{ франц}}} = 1,73$$

Таким образом, объем полостей в американских испытаниях в 5 раз больше объемов, полученных в опытах французов. Это различие подтверждается численными расчетами, в которых радиусы полостей для 5-килотонного заряда (устройство "Хардхэт") были вычислены для гранитов с различным содержанием воды и различной естественной трещиноватостью.

Порода	Радиус полости, м
Сухой монолитный гранит	12,7
Сухой трещиноватый гранит	15,0
Насыщенный водой, трещиноватый гранит	20,4

Оценки радиусов полостей и их объемов для двух глубин, представляющих интерес для геотермики, и для различных мощностей зарядов представлены в табл. 3.3 и 3.4. Эти оценки основаны на расчетах упомянутого выше адиабатического расширения и характерны для гранитных пород с некоторым содержанием воды и естественной тре-

Таблица 3.2

Результаты экспериментов в гранитных породах [1]

Устройство	Результаты измерений				$r_c / W^{1/3}$, м/кт ^{1/3}
	плотность, г/см ³	глубина размещения заряда, м	мощность ядерного устройства, кт	радиус полости, м	
"Пайпдрайвер"	2,66	462,8	61 ± 10	40,1 ± 0,5	10,2 ^{+0,5} _{-0,4} 10,23
"Хардхэт"	2,66	286,2	4,9 ± 1,5	19,2 ± 0,5	11,3 ^{+0,9} _{-0,7} 11,69
"Шул"	[2,66]	367,3	13,1 ± 1,2	[25,6 ± 0,5]	10,8 ^{+0,2} _{-0,1} 10,38

Таблица 3.3

Радиусы полостей

Глубина, км	Радиусы полостей в зависимости от мощности зарядов, м		
	200 кт	500 кт	1000 кт
2,64 ($P_0 = 68,8$ МПа)	36,96	50,16	63,20
3,3 ($P_0 = 86$ МПа)	34,68	47,07	59,30

Таблица 3.4

Объемы полостей [1]

Глубина, км	Объемы полостей в зависимости от мощности заряда, 10 ⁶ м ³		
	200 кт	500 кт	1000 кт
2,64	0,2115	0,5286	1,0569
3,3	0,1748	0,4369	0,8734

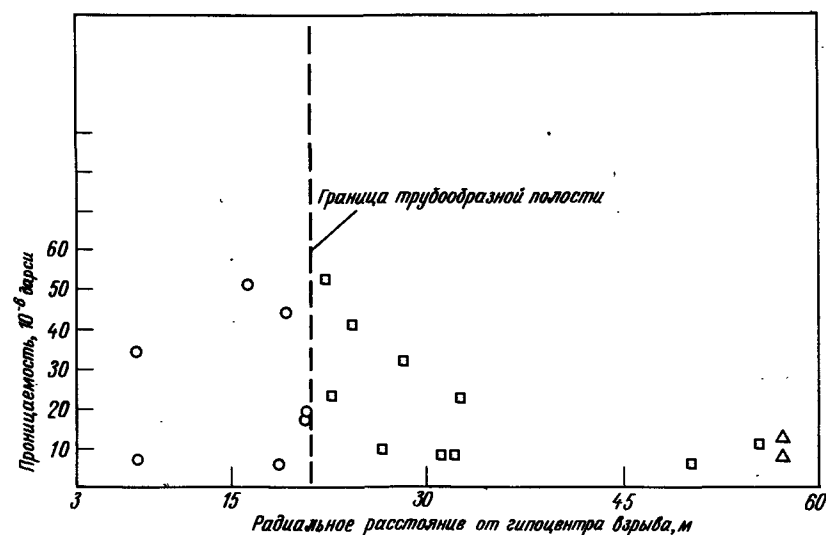
трещиноватостью. Как было показано выше, в случае более сухой и менее трещиноватой породы объемы полостей возможно будут меньшими.

Размеры зоны трещинообразования. Число трещин, образованных в породе, окружающей заряд, уменьшается в радиальном направлении с увеличением расстояния от гипоцентра взрыва. Расчеты методами горной механики распространения волны напряжений, выполненные по программе SOC, дают следующие значения размеров зон трещинообразования для взрыва мощностью 5 кт в гранитной породе при глубине размещения заряда 286 м (устройство "Хардхэт").

Порода	Радиус зоны трещинообразования, м	d_f / r_c
Сухой монолитный гранит	40 – 50	3,14 – 3,98
Сухой трещиноватый гранит	55 – 65	3,67 – 4,33
Насыщенный водой трещиноватый гранит	100	4,9

В этих расчетах размер зоны трещинообразования (d_f) определяется как расстояние от гипоцентра взрыва до зоны, где прекращается трещинообразование, вызванное разрушением породы под действием сжатия. В третьей колонке приведенной выше таблицы размер зоны трещинообразования представлен в функции радиуса полости.

Исследование кернов из скважин, пробуренных в окрестности места взрыва, позволяет определить размеры зоны трещинообразования. Определенный этим методом размер зоны трещинообразования во французских экспериментах составляет $3,7 r_c$, тогда как в случае взрыва устройства "Хардхэт" получены размеры зоны трещинообразования $\sim 2 r_c$. Однако последняя величина определена взятием проб малого размера из крупного керна, что не позволяет установить истинную картину проницаемости. Даже в трубообразной полости, в которой заведомо установлена высокая проницаемость, анализ взятых



Ф и г. 3.3. Проницаемость гранитной породы в месте взрыва устройства "Хардхэт", определенная по образцам керна [1].

O — образцы керна, извлеченные из трубообразной полости с обломками породы; □ образцы керна, извлеченные за пределами трубообразной полости; Δ образцы керна, извлеченные до взрыва. **Примечание.** Данные, полученные для трех образцов кернов, извлеченных из трубообразной полости с глубины 13,5 — 15 м ниже гипоцентра взрыва, здесь не представлены.

$$K = (7 - 15) \cdot 10^{-3} \text{ дарси.}$$

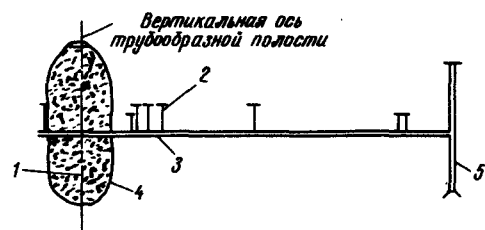
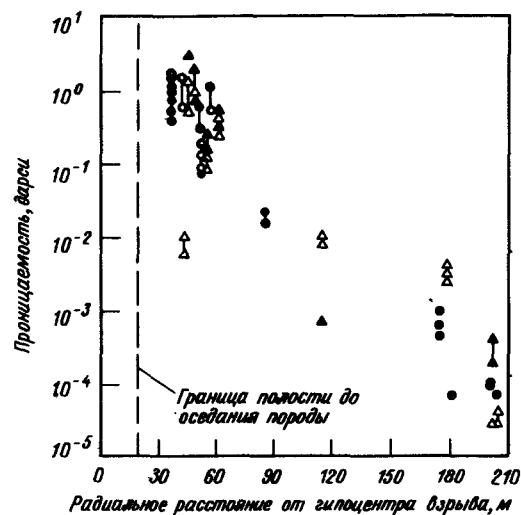
образцов обнаруживает низкую проницаемость. Проницаемость, определенная лабораторными исследованиями из кернов, извлеченных в районе взрыва устройства "Хардхэт", представлена на фиг. 3.3.

Проницаемость, измеренная в месте взрыва устройства "Хардхэт", определялась по серии нагнетательных скважин, пробуренных в стенках штока, который был проложен через трубообразную полость. Проницаемость, определенная этим методом (фиг. 3.4), существенно выше определенной с помощью кернов. Измерения показали увеличение проницаемости на расстоянии, превышающем $3 r_c$. Эти значения по всей видимости искусственно завышены из-за того, что шток был проложен в радиальном направлении до расстояния в $3 r_c$ перед взрывом. Следовательно, за этой точкой существовала свободная поверхность, и проницаемость вдоль штока могла увеличиться из-за скалывания стенок штока. Так или иначе, измерения указывают на существование области повышенной проницаемости на расстоянии по крайней мере $3 r_c$ от гипоцентра взрыва.

Информация о растрескивании была также получена путем клиперных измерений. Клипер представляет собой приемный кабель, жестко зацементированный в вертикальной скважине, пробуренной параллельно скважине для размещения заряда. Вызванная взрывом волна деформации сначала достигает нижнего конца кабеля и постепенно как бы "откусывает" нижнюю его часть. Длина кабеля непрерывно измеряется по отражению микроволн. Кабель, оставшийся после взрыва, характеризует размер области трещинообразования, а расстояния между обрывами кабеля служат мерой плотности трещин. Результаты таких измерений в ряде испытаний показали, что картина растрескивания зависит от слоистости и плоскостей ослабления в породе.

Зона повышенной проницаемости в газоносном сланце, в котором был осуществлен взрыв устройства "Гэзбугги", оценивалась на основе опытной эксплуатации трубообразной полости (фиг. 3.5). Размер зоны повышенной проницаемости составляет $3,7 r_c$.

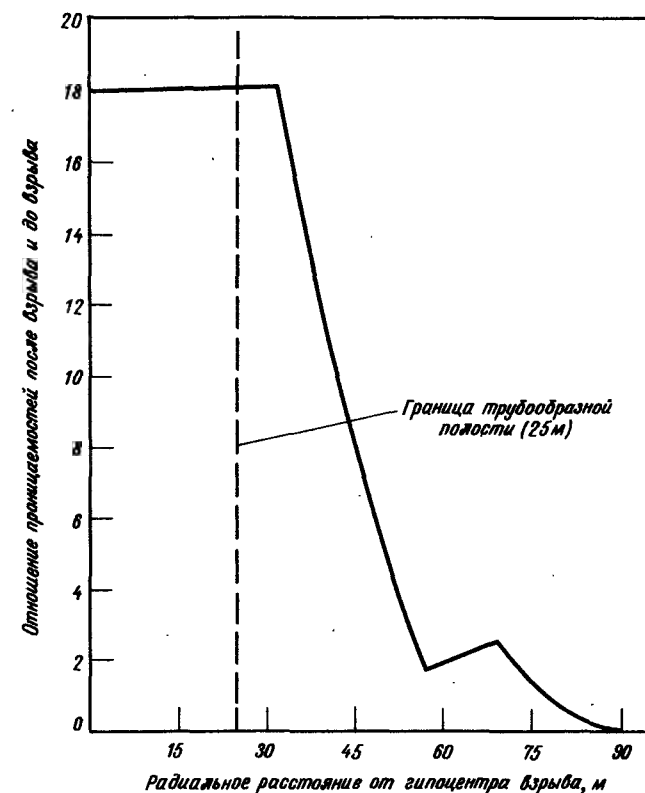
Суммируя изложенное, можно сказать, что трещинообразование зависит от содержания воды, от системы ранее существовавших трещин и от плоскостей ослабления в породе. Проницаемость породы типа той, в которой были осуществлены взрывы устройств "Хардхэт" и "Пайлдрайвер", увеличивается в радиальном направлении от гипоцентра взрыва и распространяется на расстояние не более $4 r_c$, где она достигает исходного значения. Проницаемость вблизи края трубообразной полости имеет порядок 1 дарси. Протяженность области



Ф и г. 3.4. Проницаемость гранитной породы в месте взрыва устройства "Хардхэт", определенная с помощью серии нагнетательных скважин [1].

Результаты измерений 1964 г.: Δ вертикальная скважина; $\circ$ горизонтальная скважина. Результаты измерений 1965 г.: $\blacktriangle$ вертикальная скважина; $\bullet$ горизонтальная скважина. 1 — эпицентр взрыва; 2 — нагнетательные скважины; 3 — конец штека, проложенного до взрыва; 4 — граница трубообразной полости; 5 — шахта для доступа к скважинам.

трещиноватости снижается для сухого гранита, имеющего небольшое количество первоначальных трещин. Расчеты также показывают, что размеры зоны трещинообразования могут уменьшиться для глубоко размещенных зарядов, подобных рассмотренным здесь. Такая сово-



Ф и г. 3.5. Примерная оценка увеличения проницаемости в зоне взрыва ядерного устройства "Гэзбугги" [1].

купность факторов может привести к тому, что размер зоны трещинообразования будет меньше $2,5 r_c$.

Характеристики трубообразной полости. Трубообразная полость образуется в результате обвала породы в полость, образованную взрывом, и последующего распределения объема этой полости в окружающую породу. Трубообразные полости представляют интерес из-за высокой проницаемости, относительно малых размеров кусков раздробленной породы и простоты извлечения из них тепла.

Обвал происходит из-за неустойчивости полости и может произойти в любой момент после взрыва. Например, полость, образовав-

шаяся при взрыве устройства "Хардхэт", осела спустя 11 ч после взрыва, а полость, образовавшаяся при взрыве устройства "Пайлдрайвер", осела сразу же, хотя взрывы были проведены на расстоянии 400 м один от другого в одной и той же породе. Все взрывы в гранитной породе (включая французские) привели к оседанию и образованию трубообразных полостей.

Трубообразные полости не обязательно симметричны. Окончательная форма полости в сильной степени зависит от первоначальной картины трещин в среде, залегания слоев и зон ослабления.

Объем трубообразной полости зависит от ее формы и часто эту полость представляют в виде цилиндра с полусферой или конуса с полусферой. Объемы таких моделей могут отличаться в два раза. Для трубообразной полости заданных радиуса и высоты минимальный объем соответствует форме цилиндра, накрытого полусферой. Во всех последующих расчетах принимается именно эта модель. Можно показать, что количество тепла, извлекаемое из трубообразной полости, относительно невелико (см. подразд. "Извлекаемая энергия"). Таким образом, погрешность, обусловленная принятой моделью, почти не скажется на конечном результате.

Средняя пористость трубообразной полости, определяемая как отношение объема полости, образованной взрывом, к объему трубообразной полости, после оседания вычислялась на основе результатов измерений, проведенных при взрыве устройств "Пайлдрайвер", "Хардхэт" и "Шоул". Полученные значения пористости составляют 18 – 29%. Кроме этих трех взрывов, было проведено несколько опытов на плато Пахут Меса на полигоне в шт. Невада. Эти данные указывают на тенденцию к увеличению объемов трубообразных полостей с увеличением мощности зарядов, однако окончательного заключения сделать не удается из-за сложной картины залегания туфов в Пахут Меса и из-за отсутствия знаний об относительной прочности туфов.

Подытоживая сказанное, можно отметить, что существует большая неопределенность относительно объемов трубообразных полостей из-за отсутствия информации о форме и о размерах трубообразных полостей, образованных в результате оседания больших полостей (полученных при взрыве зарядов большой мощности в твердой породе). Для грубой оценки можно воспользоваться моделью цилиндра, накрытого полусферой, с отношением его высоты к радиусу полости $\sim 4,5$.

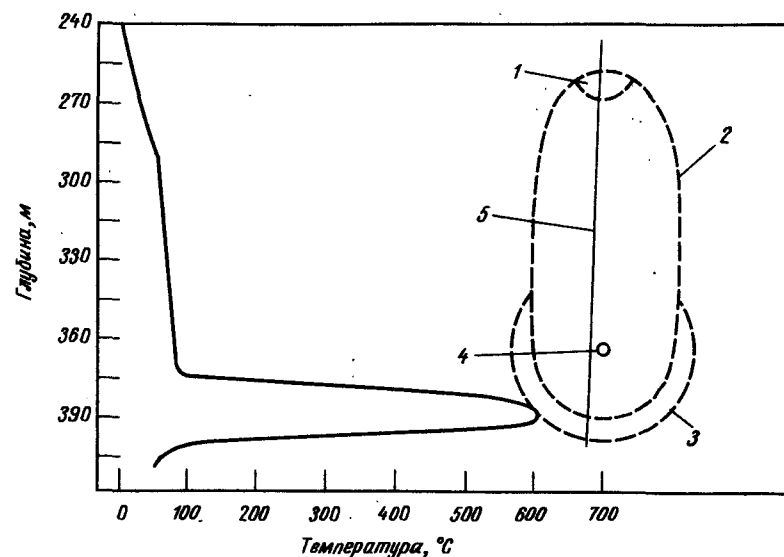
Распределение тепла, выделившегося при взрыве. Большое количество энергии, выделяющейся при взрыве, накапливается в виде

тепловой энергии вблизи места взрыва. Ядерные взрывы в соли (ядерные устройства "Гном" и "Салмон") являются примером предельного случая распределения тепла после взрыва. За исключением небольшого частичного оседания, такие полости сохраняют первоначальную форму, а расплавленная соль стекает на дно полости. В данном случае энергия взрыва сконцентрирована в тонком слое стенок полости с повышенной температурой и в слое расплавленной соли. Отбор тепла от расплавленного слоя соли или от стенок является медленным процессом, так как области повышенной температуры непроницаемы и теплопередача происходит только путем теплопроводности.

Более типичное распределение тепла, выделившегося при взрыве, было выявлено с помощью штреков, проложенных вблизи места взрыва устройства "Реньер". Когда полость после этого взрыва осела, куски породы были перемешаны с остеклованной расплавленной породой. Вода, проникавшая во время оседания в такую расплавленную породу, вскипела.

Такая вода, превращаясь в пар, просачивается через трубообразную полость и передает тепло горячей породе. На фиг. 3.6 представлен профиль температуры в разведочной скважине, измеренный через 2,5 мес после взрыва устройства "Шоул". Почти вся трубообразная полость имеет повышенную температуру. Резкий температурный максимум ($\sim 600^\circ\text{C}$) находится ниже гипоцентра взрыва и захватывает нижнюю полусферическую часть трубообразной полости. Можно допустить, что при взрыве заряда мощностью 1 кт примерно 1000 т породы нагревается до температуры плавления или выше. Следовательно, при взрыве ядерного устройства "Шоул" мощностью 13,1 кт, объем расплавленной породы должен составить $\sim 5000\text{ м}^3$. Если бы этот объем был распределен в сферическом сегменте в нижней части нижней полусферы полости, то толщина расплава достигла бы 8,76 м. Однако толщина зоны с очень высокой температурой в действительности равна 21 м. Расхождение в $\sim 12\text{ м}$ слишком велико, чтобы можно было считать, что теплопередача осуществляется только одной теплопроводностью.

Кроме того, температура в этой зоне существенно ниже точки плавления породы. Следовательно, расплавленная порода должна быть распределена в большем объеме и смешана с кусками породы. Далее, эта область должна быть достаточно проницаемой, чтобы пар мог более равномерно распределить тепло в полости.

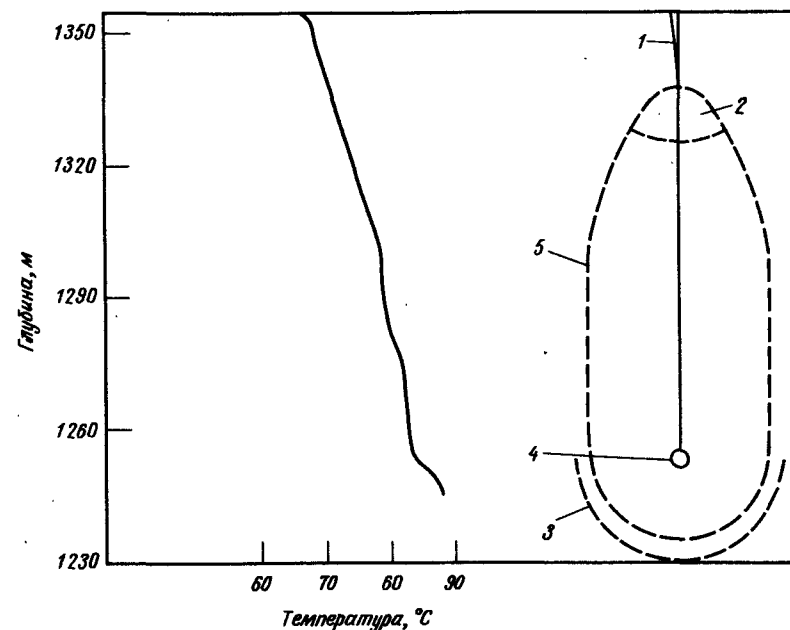


Ф и г. 3.6. Профиль температуры в разведочной скважине, измеренный через 2,5 месяца после взрыва ядерного устройства "Шоул" [1].

1 — пустая полость; 2 — трубовидная полость; 3 — расплавленная порода; 4 — гипоцентр взрыва; 5 — разведочная скважина.

Путем извлечения кернов из трубовидной полости, образованной при взрыве устройства "Хардхэт", выяснилось, что большая часть расплавленной породы собирается на дне нижней полусферы полости в слое толщиной $\sim 0,25 r_c$ ($\sim 70\%$ кернов представляют собой расплавленную породу). При помощи единственной скважины, пробуренной в трубовидную полость при взрыве устройства "Пайлдрайвер", было установлено, что расплавленная порода проникла в полость и находится на расстоянии $0,23 r_c$ ниже точки взрыва.

Исследования большого числа кернов во французских опытах показали, что расплавленный материал присутствует повсюду в осевшей полости: от 15 до 50% кернов представляют собой расплавленную породу. Более концентрированное распределение расплава, обнаруженное в полости, образованной при взрыве устройства "Хардхэт", возможно связано с большим временем, прошедшим до момента обвала



Ф и г. 3.7. Профиль температуры в разведочной скважине, измеренный через 11 месяцев после взрыва ядерного устройства "Хардхэт" [1].

1 — разведочная скважина; 2 — пустая полость; 3 — расплавленная порода; 4 — гипоцентр взрыва; 5 — трубовидная полость.

породы (11 ч для устройства "Хардхэт" и несколько секунд для устройства "Пайлдрайвер").

Проницаемость смеси расплава кусков породы трудно оценить. Из профиля температуры трубовидной полости, образовавшейся при взрыве устройства "Шоул", видно, что тепло передается конвекцией вверх из нижней полусферы. По-видимому, вода, содержащаяся в породе, превращается в пар и проходит через всю полость. Такой же профиль температуры для полости, образовавшейся при взрыве устройства "Хардхэт", который был получен спустя 11 мес после взрыва (фиг. 3.7), показывает, что температура увеличивается на протяжении всей полости, а максимум температуры находится ниже области расплавленной на 70% породы, где расплавленная порода,

Таблица 3.5

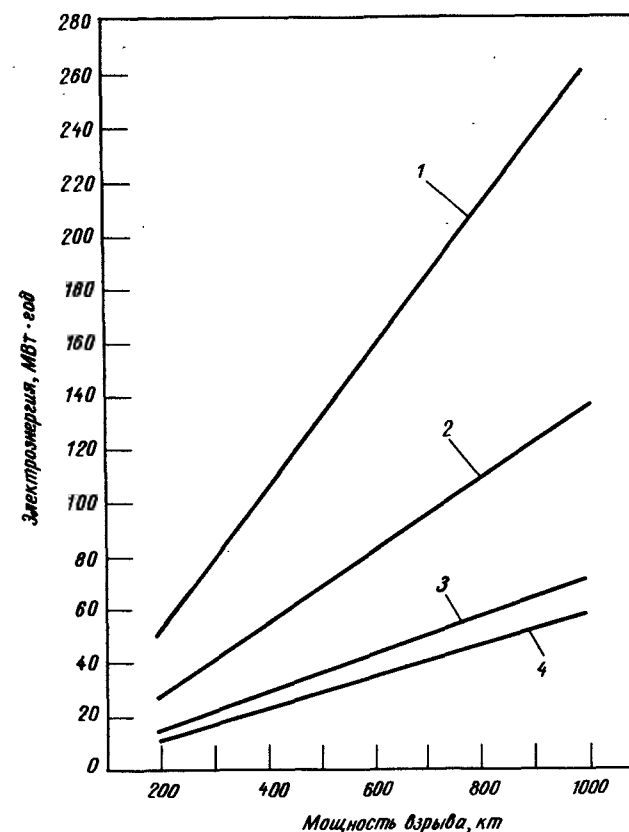
Объемы трещиноватой породы, образованные с помощью ядерных устройств различной мощности [1]

	Объемы трещиноватой породы в зависимости от мощности зарядов, 10^6 м^3		
	200 кт	500 кт	1000 кт
Трубообразная полость	0,72	1,8	3,6
Объем трещиноватой породы на расстоянии между r_c и $2r_c$	1,25	3,13	6,25
Суммарный объем трещиноватой породы на радиус до $2r_c$	1,97	4,93	9,85
Объем трещиноватой породы на расстоянии между $2r_c$ и $3r_c$	3,65	9,12	18,25
Суммарный объем трещиноватой породы на радиусе до $3r_c$	5,62	14,05	26,10
Объем трещиноватой породы на расстоянии между $3r_c$ и $4r_c$	7,18	17,95	35,9
Суммарный объем трещиноватой породы на радиус до $4r_c$	12,60	32,00	64,00

возможно внедрилась в трещины. Наибольшая зафиксированная температура составляет $\sim 85^\circ\text{C}$, что указывает на значительную конвекцию тепла.

Таким образом, по-видимому, расплавленная порода распределена по всей нижней полусфере полости, перемешана с обломками породы и эта область является проницаемой (хотя и менее чем трубообразная полость). Около 90% энергии взрыва концентрируется в этой области и затрачивается на нагревание породы. Эта энергия может быть использована благодаря распределению нагретого материала и проницаемости рассмотренной области.

Извлекаемая энергия. В табл. 3.5 представлены соответствующие объемы трещиноватой породы, которые могут быть образованы с помощью ядерных взрывов различной мощности, произведенных на глубине ~ 3 км при соблюдении ограничений, установленных в предыдущих разделах. На фиг. 3.8 приведены оценки электрической энергии, которую можно получить из этих объемов. Предполагается, что



Ф и г. 3.8. Оценки количества электроэнергии, которую можно получить из объемов трещиноватой породы, образованных одиночными взрывами [1].

1 — все тепло, извлекаемое из трубообразной полости и из трещиноватой зоны на расстоянии $4r_c$; 2 — то же на расстоянии $3r_c$; 3 — то же на расстоянии $2r_c$; 4 — только трубообразная полость (90% тепла, полученного при взрыве).

начальная температура породы 350°C , конечная температура 150°C , к.п.д. преобразования энергии 21% и константа извлечения энергии $45 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3$. Из этих графиков видно, что извлекаемой только из одной трубообразной полости энергии недостаточно для обеспечения электростанции, мощностью 200 МВт. Таким образом, процесс извле-

чения тепла представляет интерес лишь в том случае, если тепло может быть извлечено из объема трещиноватой породы, окружающего трубообразную полость (увеличение мощности заряда свыше 1000 кт недопустимо по причине сейсмического характера).

По-видимому, будет нерентабельно извлекать тепло из области трещиноватой породы, образованной одним взрывом. Однако при проведении двух или более взрывов с образованием перекрывающихся трещиноватых зон вода или пар свободно могут поступать из одной трещиноватой области в другую. Таким путем можно извлекать тепло, содержащееся в трещиноватых породах.

Следовательно, для извлечения тепла в количестве, достаточном для производства электроэнергии, необходимо осуществить серию взрывов определенным образом расположенных зарядов. Эта схема имеет то преимущество, что снижает затраты (в пересчете на один ядерный заряд) на трубопроводы большого диаметра, требуемые для эффективного вывода пара на поверхность. Заряды в этом случае можно было бы помещать в меньших и, следовательно, менее дорогостоящих скважинах (по нескольку зарядов в скважину), а трубопровод для вывода пара на поверхность потребует только один.

Системы зарядов. Как указано выше, трещиноватая область, образованная одиночным зарядом, по характеристикам теплоотдачи и по экономическим характеристикам является неподходящей для разработки. С другой стороны, системы зарядов имеют то преимущество, что стоимость трубопровода распределяется на большую энергетическую базу. Кроме того, объем, через который проходит пар или вода, в случае взрыва системы зарядов больше, чем при взрыве одиночного заряда. Наконец, общий объем образующейся трещиноватой породы при взрыве системы зарядов может оказаться больше, чем при взрыве нескольких одиночных зарядов.

Увеличение объема трещиноватой породы, получающейся при взрыве системы зарядов бризантного ВВ, хорошо известно. Коэффициент увеличения определяется как отношение объема трещиноватой породы, полученного при взрыве системы зарядов бризантного ВВ, к объему, полученному при взрывах такого же количества одиночных зарядов того же ВВ.

При взрывании уступов коэффициент увеличения составляет 1,25 — 4, при взрывах на ровной поверхности с образованием воронки 1,1 — 3, а при прокладывании туннелей достигает 4. Однако картина,

наблюдаемая при взрывах бризантного ВВ, отличается от подземных ядерных взрывов, которые рассматриваются в данной работе. В первом случае происходит одновременный взрыв нескольких зарядов, которые обычно являются линейными источниками и расположены близко к свободной поверхности. При использовании ядерных устройств большой мощности взрывы следуют один за другим, заряды являются точечными источниками и расположены вблизи "области с различными свойствами", образованной предыдущим взрывом, которая может быть, а может и не быть подобной свободной поверхности. Следовательно, трудно определить, насколько опыт, накопленный при использовании бризантного ВВ, применим к системе ядерных зарядов.

Хольцер [5] подсчитал, что объем трещиноватой породы, образованной при взрыве двух 50-килотонных ядерных зарядов, расположенных на расстоянии двух радиусов действия, на 25% превышает объем породы, образованной при взрыве 100-килотонного одиночного заряда. Он предполагает, что оптимальное расстояние между двумя зарядами составляет более двух радиусов действия. Сэлби [6] рассчитал, что при тетраэдральном расположении, при котором заряды размещают таким образом, что достигается критическое напряжение сдвига для данной породы, может быть достигнут коэффициент увеличения объема трещиноватой породы, равный 2,9.

Для осуществления Плоушерской геотермальной программы необходимо обеспечить большое количество трещиноватой породы. Если одна и та же скважина может быть использована для последовательных взрывов двух зарядов при сохранении их максимальной мощности, то можно сэкономить на стоимости работ по бурению одной скважины для размещения заряда. К тому же, возможно, что объем трещиноватой породы возрастет, если оба заряда будут взорваны одновременно. Другими словами, можно ожидать, что объем трещиноватой породы, образованной при взрыве двух 500-килотонных зарядов, превысит объем, полученный при взрыве мегатонного заряда. Однако еще не известно, оправдает ли увеличение объема трещиноватой породы стоимость дополнительного взрыва. (Стоимость одного заряда слабо зависит от его мощности, поэтому стоимость двух зарядов, грубо говоря, вдвое больше стоимости одного.)

ПРОБЛЕМЫ БУРЕНИЯ

Существует ряд неясностей и возможных трудностей, которые следует принимать во внимание при проектировании и сооружении глубо-

ких скважин в твердой породе термального района. Некоторые из этих проблем влияют на стоимость, а некоторые представляют собой технические предположения, которые проясняются в ходе исследования. Все эти проблемы сводятся к следующему.

1. Для исследования технической осуществимости программы толщина стенок обсадных труб для скважин диаметром от 305 до 915 мм была произвольно установлена равной 19 мм. Такая толщина, по-видимому, достаточна для случая, когда трубы зацементированы в породе. Для участков, на которых цементирование невозможно, и для участков, возвышающихся над землей, такой толщины стенок труб, по-видимому, недостаточно для работы во всем возможном диапазоне давлений пара. Окончательная толщина стенок будет зависеть от размера трубопровода и давления пара. Утолщение стенок обсадных труб увеличит стоимость крепления скважины.

2. Необходимо исследовать технологию цементирования при температуре 370 °C, на глубинах до 3000 м. Возможно раствор будет быстро схватываться, а вода, находящаяся в растворе, будет вскипать при такой температуре, если не приложить соответствующее давление. Известно, что при цементировании скважин в условиях нормальной температуры отвод теплоты гидратации цемента представляет определенную трудность. Хотя в высокотемпературной скважине этот процесс может быть несущественным, однако его необходимо исследовать.

3. Цементированием редко обеспечивается надежное заполнение пустот между обсадными трубами и породой. С этими пустотами следует считаться, если обсадные трубы должны выдерживать большие внутренние или внешние давления.

4. Для спуска труб со стенками толщиной 19 мм, диаметрами 305 – 915 мм на глубины 2600 – 3300 м во всех случаях требуется специальная оснастка буровой установки, чтобы предотвратить обрыв обсадных труб. Вес труб таких диаметров составляет 450 – 1350 т и более, что превышает возможности обычного подъемного механизма. Вес труб с толщиной стенок 38 мм для скважины диаметром 1370 мм и глубиной 3300 м будет более 4100 т. Чтобы выдержать растягивающие усилия, возникающие при спуске труб такого веса, потребуется применение высокопрочной стали.

5. При рассмотрении гипотетических случаев внутренние диаметры обсадных труб принимались равными 305, 460, 610, 760 и 915 мм и не соответствовали действительным внутренним диаметрам труб.

6. Для точных оценок стоимости бурения потребуются выявление границ конкретного участка и геологическая информация из разведочных скважин. Это обстоятельство подчеркивалось фирмами, производящими бурение.

7. Для удаления буровой мелочи при бурении может быть использован воздух или буровой раствор. В сухой скважине лучше всего использовать воздух. Если скважина с водой и ее цементирование ниже водоносных горизонтов слишком дорого, придется использовать буровой раствор. По сообщениям одной фирмы, пробурившей несколько скважин в граните, вода встречается практически в каждой скважине. Однако, бурение проводилось не в геотермальных районах.

8. Температуры до 350 °C могут влиять на буровое оборудование, и может потребоваться специальная смазка для муфтовых соединений и специальные буровые растворы, если таковые используются. Накоплен опыт бурения при температурах до 300 °C, и известно, что при этой температуре используют специальные растворы.

9. Для скважин диаметрами 305 – 915 мм, по-видимому, экономически более выгодно бурить скважину для размещения заряда того размера, который потребуется для паропровода, а не разбуривать скважину до большего диаметра после взрыва. Стоимость разбуривания примерно равна стоимости бурения скважины полного диаметра.

ВОПРОСЫ БЕЗОПАСНОСТИ И ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Очень важно предвидеть возможные опасные последствия осуществления Плоушерской программы, оценить их вероятность и предусмотреть специальные меры по контролю или предотвращению подобных явлений. К таким мерам относятся также проведение измерений для обеспечения безопасности и ведение документации, подтверждающей, что осуществление проекта действительно безопасно.

Радиологические вопросы. При соответствующем цементировании и укреплении ствола скважины на глубине предполагаемого залегания горячей породы вряд ли можно ожидать радиоактивного загрязнения атмосферы или подземных вод. В процессе эксплуатации электростанции радиоактивные изотопы, которые могут быть вынесены на поверхность паром, вновь будут унесены конденсатом в область, разрушенную взрывом, и вся система будет замкнутой.

Вероятность радиоактивного загрязнения атмосферы. Согласно результатам более 300 подземных ядерных взрывов, при правильном

и точном размещении зарядов и укреплении ствола скважины, выход радиоактивности на поверхность маловероятен. Ниже рассматриваются некоторые причины неожиданной утечки радиоактивности, имевшие место в прошлом, и предлагаются меры борьбы с такими явлениями.

1. Неисправное и (или) недостаточное цементирование и укрепление ствола скважины, что можно проконтролировать.

2. Недостаточная глубина размещения зарядов. В этой связи следует отметить, что данное исследование касается только такой глубины размещения зарядов, которая намного превышает глубину, необходимую для предотвращения распространения радиоактивности (примерно 120 м, умноженные на корень кубический из мощности заряда в килотоннах).

3. Просачивание через трещины или разломы в породе, окружающей скважину для размещения заряда. Эту вероятность можно свести к минимуму тщательным геологическим картографированием и выбором места взрыва.

В прошлом при небольших утечках радиоактивности последующие исследования показали, что лишь чрезвычайно малая часть радиоактивности достигла поверхности через сложную систему трещин.

В случае маловероятной утечки радиоактивности на поверхность потребуются метеорологические сводки погоды, чтобы установить направление распространения радиоактивности и принять соответствующие меры защиты. Метеорологические прогнозы могут быть сделаны на основе данных, предоставляемых стационарными метеорологическими станциями, а также данных, собранных на месте взрыва.

В итоге можно утверждать, что вероятность радиоактивного заражения биосферы можно свести к минимуму и проект может осуществляться с полной уверенностью в его безопасности.

Загрязнение подземных вод. Необходима предварительная тщательная оценка гидрогеологического режима, чтобы исключить проблему радиоактивного загрязнения подземных вод. На глубине 2,6 км взрыв произойдет ниже водного зеркала, ниже всех водоносных слоев, в породе с очень низкой водопроницаемостью. При условии отсутствия каких-либо трещин (естественных или образованных в результате взрыва), через которые флюид мог бы просочиться в близлежащие водоносные слои, перенос радиоактивности водой фактически исключается.

Необходимо обеспечить герметичность трубообразной полости относительно приповерхностных вод тщательным цементированием

верхней части ствола скважины. Отсутствие радиоактивности в скважинах и водоносных слоях должно быть подтверждено измерениями, проведенными после взрыва.

После окончания взрывных работ и завершения строительства электростанции, в процессе эксплуатации станции необходимо тщательно следить за тем, чтобы пар и конденсат не соприкасались с водоносными горизонтами, расположенными вблизи поверхности.

Защита от радиации. Задача защиты от радиации состоит в защите людей от возможного облучения и регистрации случаев облучения, когда таковые имеют место.

Эксплуатация и обслуживание систем контроля должны осуществляться персоналом, оснащенным плечными дозиметрами, защитными костюмами и аппаратурой для обнаружения и измерения излучения. Зона радиологической безопасности должна быть установлена с момента доставки ядерного заряда на место и затем в течение всей работы электростанции, причем размеры этой зоны в каждый конкретный момент определяются потенциальной опасностью аварийной ситуации и вероятностью ее реализации. Меры защиты от излучения должны также включать:

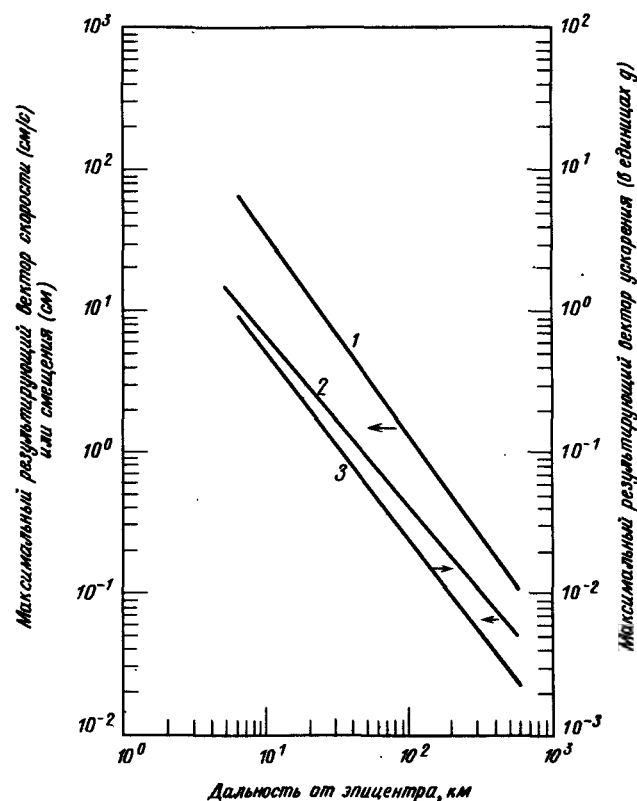
1. Взятие проб и контроль за окружающей средой в окрестности взрыва до и после него.

2. Регистрацию колебаний уровня фоновой радиоактивности.

3. Обеспечение необходимой информацией ведомств здравоохранения данного штата и привлечение их к сотрудничеству.

4. Готовность к принятию чрезвычайных мер защиты от облучения в случае неожиданной утечки радиоактивности.

Вопросы сейсмической безопасности. При проведении любого подземного ядерного взрыва необходимо принимать во внимание возможность повреждения сооружений, созданных руками человека, или природных объектов. Эта возможность обусловлена движением земной поверхности под действием волн напряжений, расходящихся в земной коре от гипоцентра взрыва. Движение земной поверхности характеризуется ускорением, скоростью и перемещением поверхности земли в данной точке. Эти параметры зависят главным образом от расстояния на поверхности до эпицентра взрыва, глубины размещения заряда, его мощности, геологии района, среды, в которой происходит взрыв, и от типа почвы или породы, на которой находится объект.



Ф и г. 3.9. Параметры движения поверхности, сложенной аллювиальными породами, в зависимости от расстояния [1].
1 — скорость; 2 — смещение; 3 — ускорение.

На фиг. 3.9 приведены зависимости параметров движения земной поверхности от расстояния, полученные по результатам измерений, проводимых во время многочисленных испытаний на полигоне шт. Невада, и являющиеся типичными для ожидаемого эффекта движения поверхности, сложенной аллювиальными породами, на расстоянии свыше нескольких километров от эпицентра взрыва 1000-килотонного заряда, заложенного на глубине 2,5 км в твердоскальной породе. Аналогичные кривые были получены для других мощностей и глубин расположения заряда.

Степень повреждения объекта зависит, в частности, от частоты волны возмущения (являющейся функцией типа почвы, мощности заряда, глубины, на которой производится взрыв и т.д.) и от частоты ответного колебания конкретного объекта. Существуют более совершенные методы расчета, учитывающие все эти факторы, но они могут быть использованы, если только имеется подробная информация относительно предполагаемого места взрыва, мощности заряда и геологии района. Большую помощь в таких оценках могли бы оказать взрывы малой мощности для сейсмической классификации данного района и экспериментальные определения собственных частот объектов.

Наряду с оценкой ответного колебания объектов необходимо обследовать состояние, в котором находятся объекты, расположенные в данном районе, и рекомендовать меры защиты тех из них, которые могут быть повреждены в результате земных колебаний. Такой осмотр должен включать исследование состояния фундаментов, определение ответного колебания объектов и естественных уровней земных колебаний для объектов, расположенных в данной местности.

Необходимо провести обследование шахт до взрыва и после него, склонов, мест возможного обвала породы, а также нефтяных и газовых скважин данного района, которые могут быть повреждены при взрыве. Осмотр, предшествующий ядерному взрыву, включает исследование и описание состояния шахт, скважин и обслуживающих их наземных сооружений, которые могут пострадать, и при необходимости разработку рекомендаций по созданию специальных креплений или принятию других мер, необходимых для предотвращения или уменьшения потенциального ущерба.

Вызванные взрывом подземные толчки. Накопленный в течение нескольких лет опыт проведения подземных испытаний, свидетельствует о том, что подземные ядерные взрывы могут оказывать влияние на локальную сейсмическую активность. Характер влияния и его интенсивность зависят от двух основных факторов: энергетической мощности взрыва и уровня напряжения и тектонической активности данной области. Самый крупный из подземных ядерных взрывов вызвал небольшие подземные толчки в непосредственной близости от места взрыва, помимо обычно регистрируемых сигналов, вызываемых оседанием полости взрыва. Наибольший из зарегистрированных на сегодняшний день подземных толчков был в 100 раз слабее, чем сиг-

нал самого взрыва. Есть основания полагать, что эти сигналы возникают как реакция окружающей породы на нестационарный процесс возмущения, порожденного взрывом. Для взрывов мощностью в несколько мегатонн, расстояние, на которое распространились эти сигналы от источника, составляло не более 15 км. Естественные сейсмические процессы подобны крупным подземным взрывам тем, что за основным толчком обычно следуют многочисленные толчки меньшей силы.

В связи с этим возникает вопрос, не может ли подземный ядерный взрыв вызвать "естественное" разрушительное землетрясение в непосредственной близости от взрыва или на некотором расстоянии от него. Этого ни разу не случалось в прошлом, и вряд ли можно ожидать, что это когда-либо произойдет, особенно в тектонически устойчивом районе. В тектонически неустойчивом районе (каковым может оказаться геотермальный район) или там, где местные напряжения могут достичь уровня, при котором следует ждать естественного землетрясения, существует некоторая вероятность, которой нельзя пренебрегать, что ядерный взрыв может ускорить землетрясение.

Возбуждение вулканической деятельности. Выход на поверхность раскаленной породы в результате подземного ядерного взрыва представляется весьма маловероятным. Теоретически возможно, что:

- 1) порода, расплавленная энергией взрыва, поднимается через образовавшиеся трещины в перекрывающей породе и выйдет на поверхность;
- 2) ранее существовавшая магма, находившаяся в состоянии покоя в естественном резервуаре ниже зоны взрыва, придет в движение и извергнется на поверхность через образовавшиеся в результате взрыва трещины.

Вероятности каждого из этих двух событий следует рассмотреть отдельно. Результаты предыдущих испытаний в сходных породах свидетельствуют, что количество расплавленной породы, образующейся при взрыве, составляет ~ 1000 метрических тонн на килотонну заряда. Взрыв заряда мощностью в 1000 кт приведет к образованию $400\,000\text{ м}^3$ расплавленной породы. Несмотря на то что этот объем огромен, опыт предшествующих 300 подземных взрывов свидетельствует о том, что вся эта порода остается в замкнутом объеме, непосредственно окружающем зону взрыва, если заряд размещается достаточно глубоко и если через зону взрыва не проходят естественные трещины, выходящие на поверхность. Размещение заряда в данном исследовании на трехкилометровой глубине полностью исклю-

чает возможность выхода расплавленной породы на поверхность. Второе условие, заключающееся в том, что естественный объем расплавленной магмы, расположенный ниже места взрыва, придет в движение под действием взрыва, не исключается.

Необходимо рассмотреть по крайней мере три фактора. Во-первых, ударная волна может вскрыть трещины или старые каналы, через которые магма может подняться под действием гидростатической силы. Во-вторых, волна сжатия может увеличить текучесть жидкой породы, как в случае некоторых тиксотропных материалов, и вызвать заполнение ею трещин. Наконец, ударная волна может вызвать внезапное выделение газов, растворенных в магме, и жидкость начнет пениться подобно тому, как встряхивание газированных напитков приводит к образованию пены и переливанию жидкости через край.

Возможность такого возбуждения вулканического извержения зависит от близости расположения магматического очага и наличия открытых трещин или старых каналов, через которые магма может излиться на поверхность. При соблюдении разумных предосторожностей опасность возбуждения ядерным взрывом вулканического извержения можно значительно уменьшить или полностью исключить.

Гидротермальные взрывы. Гидротермальный взрыв отличается от вулканического извержения тем, что в нем не участвует магма. Такой взрыв может произойти в районах, где система циркулирующей воды переносит тепло с некоторой глубины на поверхность. Вблизи поверхности часть этой воды может достичь температуры, близкой к температуре мгновенного парообразования. Кроме того, при "самозакупоривании" трещин, в результате отложения в них минеральных веществ или изменений пород, может возникнуть давление, превышающее гидростатическое.

Если большая масса воды будет находиться в состоянии, близком к вскипанию, любая неустойчивость, например падение давления на поверхности, может привести к мгновенному превращению в пар всего объема воды и вызовет гидротермальный взрыв. Подобные взрывы происходят довольно редко. На земле существует довольно много районов с термальными источниками, однако лишь в немногих происходили гидротермальные взрывы. Следовательно, для возникновения такого взрыва требуются весьма специфические условия.

Рассматриваемая здесь Плоушерская программа использования геотермальной энергии не предназначена для районов, где существу-

ет естественная система циркуляции воды. Более того, нет планов создания систем, содержащих большие объемы сильно перегретых вод. Возможно, что если бы в районе осуществления Плоушерской программы существовали термальные источники с температурой, близкой к температуре кипения, подземный толчок мог бы возбудить гидротермальный взрыв. Вероятность этого события и потенциальную опасность, связанную с таким взрывом, по-видимому, надо оценивать применительно к конкретной геотермальной площадке.

Экологические проблемы. Должно быть проведено экологическое исследование предполагаемого места для осуществления Плоушерской геотермальной программы, которое должно включать оценку влияния ядерного взрыва, строительства и эксплуатации электростанции на живые организмы данного района и на окружающую среду. Поскольку методы строительства и материалы для геотермальной станции являются стандартными, используемыми на других стройках, никаких новых экологических эффектов не предвидится. Однако, как в любом проекте строительства, должны быть по возможности приняты обычные меры предосторожности, связанные с защитой окружающей среды. Влияние бассейна для охлаждения конденсата на уровень и движение грунтовой воды во время работы станции представляет собой потенциальную проблему. Необходимо изучить вопрос о том, насколько просачивание из этого бассейна может повлиять на уровни грунтовой воды и на движение термальных вод.

Необходимо определить существующее в настоящее время местное и региональное использование подземных вод. Необходимо также предсказать будущее использование подземных вод, поскольку сооружение геотермальной станции и региональное развитие, по всей вероятности, приведут к интенсификации использования земель для ирригации, промышленного производства и получения питьевой воды. Из-за потерь воды, связанных с просачиванием и испарением, необходимо восполнять ее количество в бассейне для охлаждения, и это количество должно быть оценено. Дополнительно потребуется сброс замешенной воды из бассейна для охлаждения, если требуется поддерживать содержание солей на уровне, приемлемом для эксплуатации электростанции. Если этого не делать, то возможны нежелательные биологические эффекты.

При рассмотрении ядерного взрыва и эксплуатации электростанции могут обсуждаться две новые проблемы — движение земной поверхности, вызванной взрывом, и возможность утечки на поверхность

радиоактивности во время взрыва или во время эксплуатации электростанции. Однако эти проблемы на самом деле не новы, поскольку фактические и потенциальные воздействия на окружающую среду из этих источников анализируются уже в течение многих лет и во многих странах.

Классическим исследованием по проблеме окружающей среды является исследование, проведенное в районе мыса Томпсон на Аляске по Плоушерской программе под руководством Комиссии по атомной энергии в 1959 — 1961 гг. Нет необходимости проводить такие подробные исследования для каждого района, однако следует собрать достаточное количество экологических данных для всестороннего анализа возможного влияния на окружающую среду и для обеспечения основы для разработки способов, сводящих к минимуму или полностью исключающих нежелательные воздействия на окружающую среду.

ОБЩЕСТВЕННОЕ МНЕНИЕ

Чтобы Плоушерская геотермальная программа была коммерчески дееспособна, она должна встретить понимание и поддержку общественности. Этого необходимо добиться на самой ранней стадии, полностью информируя местную общественность и официальные круги как о целях и преимуществах программы, так и о возможном риске.

Следует использовать ознакомление работников массовой информации, открытые обсуждения, выставки и популярные брошюры, чтобы дать возможность высказаться всем слоям общественности в поддержку проекта или с его критикой и иметь возможность ответить на все вопросы, касающиеся проекта. Следует ознакомить общественность со всеми возможными последствиями взрыва и эксплуатации электростанции, включая возможность аварийных ситуаций, более серьезных, чем можно было ожидать. Общественность должна быть полностью проинформирована о мерах предотвращения неожиданных ситуаций и обеспечения безопасности населения в случае аварийной ситуации.

Ответственность за безопасную и правильную эксплуатацию Плоушерской системы ложится на потребляющую отрасль промышленности и на общественные организации. Общественность осуществляет контроль с помощью органов местного и государственного управления. Работы, проводимые в рамках этой программы, подлежат надзору со стороны местных и федеральных властей. На потребляющую отрасль

промышленности накладывается обязательство проводить необходимые исследования, чтобы показать, что подобные проекты можно осуществлять без излишнего риска для населения и окружающей среды.

Извлечение тепла

Согласно оценкам, электроэнергия, которая может быть получена из тепловой энергии, извлеченной из одной только трубообразной полости, слишком мала, чтобы представлять интерес для 200-мегаваттной электростанции, даже если бы были использованы заряды очень большой мощности. Следовательно, необходимо извлечь дополнительное тепло из окружающей трубообразную полость трещиноватой породы. Это можно сделать, последовательно взрывая заряды при таком их размещении, чтобы зоны трещинообразования перекрывались. Эффективность схемы зависит от того, сможет ли поток воды или пара просочиться через трубообразную полость и трещиноватую область, чтобы отобрать из породы тепло. Отбор достаточного количества тепла зависит в первую очередь от сопротивления потоку теплоносителя в трещиноватой области и от того, сможет ли поток распределиться в достаточно большом объеме трещиноватой породы.

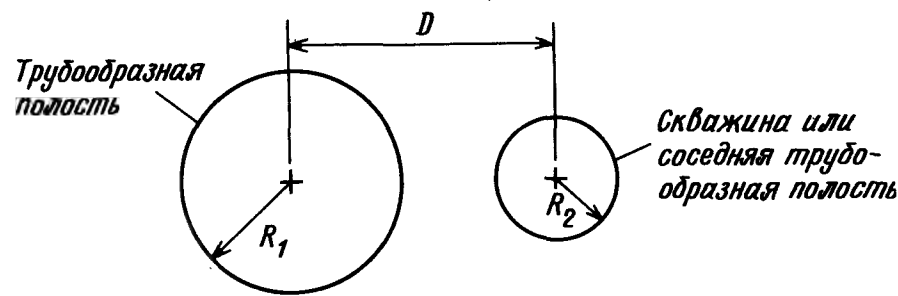
Можно проанализировать расходы воды и пара в трещиноватой области и теплоотдачу к теплоносителю и определить, можно ли отвести тепло от породы таким образом, чтобы удовлетворить потребности электростанции в паре. Нецелесообразно проводить подробные расчеты расхода в трещиноватой области, поскольку характеристики трещин еще очень плохо изучены. Однако, исходя из упрощенной геометрии, можно получить оценки потерь теплоносителя, режимов течения и теплопередачи. Можно оценить давление, необходимое для того, чтобы обеспечить движение теплоносителя из трубопровода в трубообразную полость или между трубообразными полостями. Перепад давлений, по-видимому, будет приемлемым, если средняя проницаемость формации будет больше $\sim 10^{-2}$ дарси. Расчетные значения скоростей и чисел Рейнольдса соответствуют условиям медленного и ламинарного течения. Анализ тепловых потоков указывает на достаточное количество тепла, которое можно отобрать от горячей породы трубообразной полости и трещиноватой области, но неясно, как сильно на отбор тепла влияет неодинаковое растекание потока в областях с большей проницаемостью и областях с меньшей проницаемостью.

ПОТЕРИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ И ПРОНИЦАЕМОСТЬ

Сопротивление среды течению теплоносителя зависит от ее проницаемости и характеризуется давлением теплоносителя, необходимым для поддержания течения. Оценка этого давления для 3-километрового, заполненного водой трубопровода, подведенного к трещиноватой области, и давления пара в паропроводе на входе в турбину 5 МПа дает величину 25 МПа. Давление, требуемое для протекания потока через трубообразную полость, как следует из закона Дарси, значительно меньше этой величины. Поток может поступать в трещиноватую область как через вертикальную скважину, пробуренную рядом с трубообразной полостью, так и из соседней трубообразной полости (фиг. 3.10). Давление, требуемое для поддержания начального расхода $m = 270$ кг/с, при отношении радиусов $R_1/R_2 = 200$, для различных размеров трещиноватой области D/R_1 и проницаемостей, представлено в табл. 3.6. Если средняя проницаемость породы меньше $\sim 10^{-2}$ дарси, то давления в 25 МПа будет недостаточно для поддержания течения теплоносителя.

Результаты для двух соседних трубообразных полостей одинакового размера $R_1 = R_2$ при тех же самых условиях представлены в табл. 3.7.

Если проницаемость составляет $\sim 10^{-2}$ дарси и менее и расстояние между трубообразной полостью и скважиной $D = 4R_1$, то требуемого давления в 25 МПа будет недостаточно. При использовании большего числа трубопроводов или большего числа трубообразных полостей для распределения потока допустимы меньшие проницаемости пород и (или) большие расстояния D .



Фиг. 3.10. Схема расположения трубообразных полостей.

Таблица 3.6

Давления, требуемые для поддержания течения теплоносителя через трещиноватую область между трубопроводом и соседней трубообразной полостью, $R_1/R_2 = 200$ [1]

Проницаемость трещиноватой области, мдарси	Требуемое давление для различных размеров трещиноватой области D/R_1 , МПа			
	2	4	6	8
1000	0,66	0,825	0,913	0,976
100	6,6	8,25	9,13	9,76
10	66	82,5	91,3	97,6

Таблица 3.7

Давления, требуемые для поддержания течения теплоносителя через трещиноватую область между двумя соседними трубообразными полостями, $R_1 = R_2$ [1]

Проницаемость трещиноватой области, мдарси	Требуемое давление для различных размеров трещиноватой области D/R_1 , МПа				
	2	3	4	6	8
1000	0	0,197	0,270	0,363	0,44
100	0	1,97	2,7	3,63	4,4
10	0	19,7	27	36,3	44

Проницаемость трещиноватой области недостаточно хорошо известна. Она колеблется от довольно большого значения вблизи трубообразной полости до относительно малого значения, характерного для границы трещиноватой области. Константу проницаемости, которая используется в расчетах, следует рассматривать как усредненную величину. Приведенные выше результаты свидетельствуют о том, что полезной частью трещиноватой области может считаться зона, окружающая трубообразную полость, в которой средняя проницаемость составляет $\sim 10^{-2}$ дарси и выше.

Различные участки трещиноватой области из-за различной проницаемости будут оказывать разное сопротивление потоку теплоносителя. Следовательно, из-за преимущественного распределения потока в областях с большей проницаемостью происходит сокращение объема трещиноватой породы, от которой может быть получено тепло. Прове-

дение подробных расчетов распределения потока в настоящее время теоретически возможно, но практически нецелесообразно, поскольку известно слишком мало о реальных характеристиках трещиноватых областей.

РЕЖИМЫ ТЕЧЕНИЯ

Поток теплоносителя в трубообразной полости и в трещиноватой области можно охарактеризовать его скоростью и числом Рейнольдса. Как в трубообразной полости, так и в трещиноватой области скорости и числа Рейнольдса достаточно малы, что позволяет считать поток медленным, вязким и нетурбулентным.

Массовый расход пара в момент пуска электростанции составляет ~ 270 кг/с, а плотность пара в полости $30,6$ кг/м³. В случае типичной трубообразной полости с радиусом поперечного сечения 60 м и пористостью 20% для обеспечения такого массового расхода требуется скорость потока $0,4$ см/с.

В начале эксплуатации месторождения кинематическая вязкость пара равна $0,0069$ см²/с. Если ширину зоны L , через которую протекает поток по трубообразной полости, выразить в сантиметрах, то число Рейнольдса для этого потока будет равно $58 L$. На конечных этапах извлечения тепла из полости при конечном режиме работы турбины массовый расход пара возрастает до 455 кг/с, плотность пара в полости падает до $6,66$ кг/м³, а кинематическая вязкость становится равной $0,02$ см²/с. При таких условиях скорость потока будет 3 см/с, а число Рейнольдса $128 L$.

Площадь поперечного сечения потока в трещиноватой области, окружающей трубообразную полость, примерно в четыре раза больше площади поперечного сечения самой полости, но пористость уменьшается до $\sim 1\%$. Следовательно, скорости и числа Рейнольдса, вычисленные для трубообразной полости, будут примерно в пять раз больше, чем для трещиноватой области. Таким образом, как указывалось выше, течение как в трубообразной области, так и в трещиноватой области является медленным, вязким и нетурбулентным.

ТЕПЛОТДАЧА ОТ ТРУБООБРАЗНОЙ ПОЛОСТИ

Время теплоотдачи от раздробленной породы в трубообразной полости оценено, исходя из предположения, что кусок породы можно представить в виде сферы определенного размера, погруженной в

термостат с постоянной температурой. Вычисленные величины времени теплоотдачи равны:

Радиус куска породы, см	Время теплоотдачи
10	6,4 к
50	160 ч
100	26,6 сут
500	1,82 года

Предполагается, что все куски породы в трубообразной полости имеют радиус, меньший 100 см, и ~80% кусков породы имеют радиус меньший 50 см. Приведенные выше расчеты показывают, что имеется достаточное время для передачи тепла от породы трубообразной полости для нагрева воды до парообразного состояния. Аналогичные качественные результаты можно получить при анализе, проведенном для кусков породы другой формы.

ИЗВЛЕЧЕНИЕ ТЕПЛА ИЗ ТРЕЩИНОВАТОЙ ОБЛАСТИ

Трудно рассчитать количество тепла, которое можно извлечь из трещиноватой области, образовавшейся при взрыве системы зарядов. Однако значительного понимания сути явлений можно достичь, анализируя процесс теплоотдачи потоку, протекающему по одной трещине, расположенной в бесконечной среде.

Расчеты показывают, что большая часть тепла, сосредоточенная на участке длиной ~1 м вдоль трещины и шириной по 0,5 м по обе стороны трещины, при указанных выше условиях может быть отбрана в течение 1 года. Таким образом, если плотность трещинообразования будет равна одной трещине шириной в 1 мм на 1 м породы, то этого будет вполне достаточно для передачи всего тепла, запасенного в трещиноватой породе.

К сожалению, о возникновении трещин в трещинообразной области известно столь мало, что невозможно определить ни расстояния от места взрыва, на котором достигается такая плотность трещинообразования, ни ширины трещин в трещиноватой области.

Эксплуатация электростанции

КАЧЕСТВО ПАРА

Чистота пара, полученного в трещиноватой области, оказывает определяющее влияние на выбор конструкции, стоимость и эксплуатацию геотермальной станции. Количество и тип примесей, содержа-

щихся в паре, могут оказать влияние на конструкцию конденсационной турбины, на коэффициент полезного действия электростанции и даже на требования, связанные с безопасностью.

При ряде допущений относительно химических соединений, образующихся при взрыве, их отложений в полости и их реакций с водяным паром, были выполнены расчеты радиоактивности пара. Оценены также содержание в паре кремнезема и солей. Исследованы неконденсирующиеся газы и коррозионно-активные элементы в естественном геотермальном паре.

Радиоактивность, вызванная взрывом. Уровень возникающей радиоактивности зависит от мощности заряда и соотношения между реакциями деления и синтеза. В данном разделе оценена радиоактивность для самого мощного заряда, допускаемого правилами наземных испытаний, и для предельных случаев, когда имеет место только реакция деления или только реакция синтеза. В табл. 3.8 приведены радиоактивные изотопы, состоящие из продуктов деления, и искусственные радиоактивные изотопы в почве, которые, по-видимому, будут присутствовать в значительных количествах спустя 180 сут после взрыва 1000-килотонного заряда, и которые могут обладать определенной летучестью в предполагаемых условиях эксплуатации.

Это те изотопы, которые по всей вероятности могут оказаться в газообразном состоянии в паре. В табл. 3.8 также включены данные о периоде полураспада каждого изотопа, активности каждого из них, ожидаемой спустя 180 сут после 1000-килотонного взрыва, и соответствующая каждому изотопу мощность гамма-излучения. Последняя величина необходима для расчета мощности дозы гамма-излучения.

Следует подчеркнуть, что значения искусственной радиоактивности, приведенные в табл. 3.8, соответствуют взрыву заряда без нейтронного экранирования. Расчеты показывают, что каждым 15 см экрана из борной кислоты соответствует десятикратное уменьшение заражения почвы. Уровень искусственной радиоактивности также зависит от состава почвы (результаты расчетов, приведенные в табл. 3.8, получены для гранитной породы, в которой был произведен взрыв устройства "Хардхэт") и особенностей конструкции ядерного заряда. Разумно ожидать, что заряд можно экранировать путем расширения скважины на глубине и использования экранирующей жидкости.

Удаление радиоактивных неконденсирующихся газов. Присутствующие в паре неконденсирующиеся газы будут накапливаться в конден-

Таблица 3.8

Потенциально летучие радиоактивные изотопы [1]

Изотоп	Период полу- распада	Деление		Синтез (атомный взрыватель мощностью 3 кт)	
		актив- ность, кКи	мощность гамма-изпу- чения, МэВ/с	активность, кКи	мощность гамма-излуче- ния, МэВ/с
^{85}Kr	10,7 года	19	$1,41 \cdot 10^{12}$	0,057	$4,2 \cdot 10^9$
^{103}Ru	40 сут	1150	$2,1 \cdot 10^{16}$	3,45	$6,3 \cdot 10^{13}$
^{106}Ru	1 год	1000	$3,37 \cdot 10^{15}$	3,0	$1 \cdot 10^{13}$
^{125}Sb	2,7 года	60	$9,6 \cdot 10^{14}$	0,18	$2,9 \cdot 10^{12}$
$^{127\text{M}}\text{Te}$	109 сут	90	$6,7 \cdot 10^{11}$	0,27	$2,0 \cdot 10^9$
^{137}Cs	30 лет	180	$3,8 \cdot 10^{15}$	0,54	$1,14 \cdot 10^{13}$
Искусственные радиоактивные изотопы в почве ¹⁾					
^3H	12,3 года	220	—	20 290 ²⁾	—
^{22}Na	2,6	—	—	0,6	$4,9 \cdot 10^{13}$
^{32}P	14,3 сут	2	—	2,5	—
^{35}S	88 "	29	—	40	—
^{37}Ar	35 "	70	—	200	—
^{134}Cs	2 года	14	$7,8 \cdot 10^{14}$	18,3	$1,0 \cdot 10^{15}$

¹⁾ Эти значения активности найдены пересчетом по пинейной зависимости с использованием значений, полученных для 50-килотонных атомного и термоядерного устройств, Грином и Лесспером (Лоуренсиская радиоакционная лаборатория, частное сообщение).

²⁾ К искусственной активности в почве 290 кКи добавлена активность трития из термоядерного топлива. В предположении, что на 1 кт мощности термоядерного заряда приходится 2 г остаточного трития, эта дополнительная активность составляет 20 000 кКи.

саторе: Неконденсирующиеся газы, которые содержатся в природном паре, удаляются из конденсатора в атмосферу с помощью вытяжных вентиляторов. Согласно Плоушерской геотермальной программе, сбор и захоронение неконденсирующихся газов может быть осуществлен под землей, если только их содержание в породе достаточно мало для осуществления простого захоронения. Например, количество неконденсирующихся газов, содержащихся в геотермальном месторождении

Лардерелло, слишком велико для их захоронения без предварительной обработки и отделения от них радиоактивных газов.

Для отделения криптона, с которым связаны наибольшие трудности, можно было использовать фреоновые установки, в которых криптон можно было бы сжимать и хранить или сжимать и возвращать в рабочую полость. При применении термоядерных зарядов количество криптона уменьшается на несколько порядков, но значительно увеличивается количество аргона. Кроме того, при взрыве термоядерных зарядов образуется значительно больше трития, который замещает водород в воде и (или) паре, что значительно затрудняет его удаление. В связи с этим потребуются соответствующие меры, гарантирующие его безопасное удержание.

Ожидаемая радиоактивность пара. Спустя 180 сут после ядерного или термоядерного взрыва в паре могут оказаться летучие продукты деления ^{85}Kr , ^{103}Ru , ^{106}Ru , ^{106}Rh , ^{125}Sb , $^{127\text{M}}\text{Te}$ и ^{137}Cs . Искусственными радиоактивными изотопами являются ^3H , ^{22}Na , ^{32}P , ^{35}S , ^{37}Ar и ^{134}Cs .

Подчеркнуты важнейшие изотопы, являющиеся источником значительного гамма-излучения. Для заряда мощностью 1000 кт мощность гамма-излучения спустя 180 сут для всех приведенных выше изотопов составляет $3 \cdot 10^{16}$ МэВ/с в случае чисто атомного устройства, и $1,1 \cdot 10^{15}$ МэВ/с для термоядерного устройства, имеющего 3-килотонный атомный взрыватель. Хотя термоядерное устройство создает меньший уровень гамма-излучения летучих изотопов, оно вызывает высокую степень бета-активности, связанную с присутствием трития.

Для определения активности гамма-излучения пара используется термодинамическая модель, основанная на фактической летучести различных гамма-излучающих изотопов, поскольку условие абсолютной летучести этих изотопов, по-видимому, является слишком жестким. Чтобы провести термодинамические расчеты применительно к этой задаче, необходимо сделать ряд допущений о процессах и реакциях, происходящих во время образования взрывной полости.

Вскоре после ядерного взрыва практически вся испарившаяся порода и вещества, выделившиеся при взрыве (кроме пара и постоянных газов), сконденсируются. Сконденсируются жаропрочные радиоактивные материалы, а также часть летучих радиоактивных веществ. Последними из испарившихся составляющих породы сконденсируются остаточные количества щелочных металлов и кремнезема. Этот позд-

нее образовавшийся конденсат будет, по-видимому, более насыщен летучими радиоактивными изотопами, чем основной конденсат, и будет физически отделен от него, проникнув, например, в область трубообразной полости еще до конденсации.

Условия более поздней конденсации определяются натрием и калием — основными щелочными металлами, находящимися в породе. В данных условиях можно ожидать, что основными их соединениями в паровой фазе будут NaOH (г) и KOH (г). Конденсированными соединениями, вероятно, являются карбонаты и силикаты; причем для термодинамических расчетов можно принимать, что они будут в виде $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$, $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$, K_2CO_3 , $\text{K}_2\text{Si}_4\text{O}_9$ и KAlSi_3O_8 . Конденсация щелочного металла в виде карбоната или силиката зависит от парциального давления CO_2 в газе и ряда кинетических факторов.

Конденсированные NaOH и KOH образовываться не будут из-за высокого давления их паров при данных условиях. Согласно имеющимся термодинамическим данным, давление паров гидроокисей щелочных металлов должно превышать 100 Па. Давление паров летучих частиц гидроокиси кремния при этих условиях также выше 100 Па, поэтому прямые реакции в газовой фазе могут также привести к образованию силиката. Таким образом, возможны либо реакции газа с поверхностью, либо реакции между двумя газами, которые приводят к поздней конденсации силикатов и карбонатов щелочных металлов при температурах ~ 1300 К и ниже. Предположение о том, что паровая фаза содержит NaOH (г) и KOH (г) под давлением 100 Па в объеме 10^6 м³, означает, что $\sim 2 \cdot 10^4$ г-атом щелочных металлов сконденсируется при температуре ниже ~ 1300 К (т.е. при температуре ниже температуры затвердевания породы).

Предполагается, что все потенциально летучие изотопы, приведенные в табл. 3.9, за исключением постоянных газов, связаны с поздней конденсацией силикатов и карбонатов щелочных металлов. Кроме того, предполагается, что эта конденсация происходит в течение секунд или минут. Вследствие такой задержки во времени этого процесса (по сравнению с процессом остекловывания) конденсат, по-видимому, проникает в область трубообразной полости и образует слой на поверхности породы.

Из табл. 3.9 можно сделать вывод, что если в полости существуют восстановительные условия и там имеется некоторое количество остаточной двуокиси углерода, летучие изотопы рутения подавляются, а летучие изотопы цезия будут представлены соединением CsCl . В момент пуска электро-

Таблица 3.9

Относительная летучесть в паре потенциально летучих гамма-излучателей через 180 сут после ядерных взрывов общей мощностью 1 Мт [1]

Изотоп	Период полураспада	Мощность гамма-излучения ¹⁾ , МэВ/с	Содержание изотопа через 180 сут, г-атом	Летучесть в паре при давлении 8 МПа и температуре 350 °С
⁸⁵ Kr	10,7 года	$0,14 \cdot 10^{13}$	0,57	Постоянный газ
¹⁰³ Ru	40 сут	$2040 \cdot 10^{13}$	0,35	Высокая в окислит. атм. Низкая в восстановит. атм.
¹⁰⁶ Ru (¹⁰⁶ Rh)	1,0 год	$337 \cdot 10^{13}$	2,8	Высокая в окислит. атм. Низкая в восстановит. атм.
¹²⁵ Sb	2,7 года	$96 \cdot 10^{13}$	0,45	Вероятно высокая
^{127m} Te	109 сут	$0,07 \cdot 10^{13}$	0,075	Высокая
¹³⁷ Cs	30 лет	$374 \cdot 10^{13}$	15,1	Низкая в присутствии CO_2 Высокая (30%) в отсутствие CO_2
¹³⁴ Cs ²⁾	2 года	$78 \cdot 10^{13}$	0,08	Высокая (10%) в присутствии хлорида
Всего:		$2955 \cdot 10^{13}$		

¹⁾ Средняя энергия гамма-излучения составляет $\sim 0,5$ МэВ.

²⁾ Цезий-134 — продукт активации в отсутствие нейтронного экранирования.

станции газ, находящийся в полости, будет содержать максимум гамма-активности $1,4 \cdot 10^{15}$ МэВ/с, представленной 100% ¹²⁵Sb и 10% ¹³⁷Cs и ¹³⁴Cs. При приведенной выше максимальной активности можно подсчитать интенсивность гамма-излучения на поверхности трубопровода диаметром 457 мм в предположении, что он является цилиндром бесконечной длины и что радиоактивных отложений на стенках трубопровода не имеется. Это дает мощность дозы ~ 25 мР/ч.

Рассчитанная максимальная активность изотопов в паре такова, что было бы нежелательно использовать барометрический конденсатор, в котором конденсат пара смешивается с водой в бассейне для охлаждения конденсата. Когда будет достаточно экспериментальных данных о степени радиоактивности пара, будет полезно провести

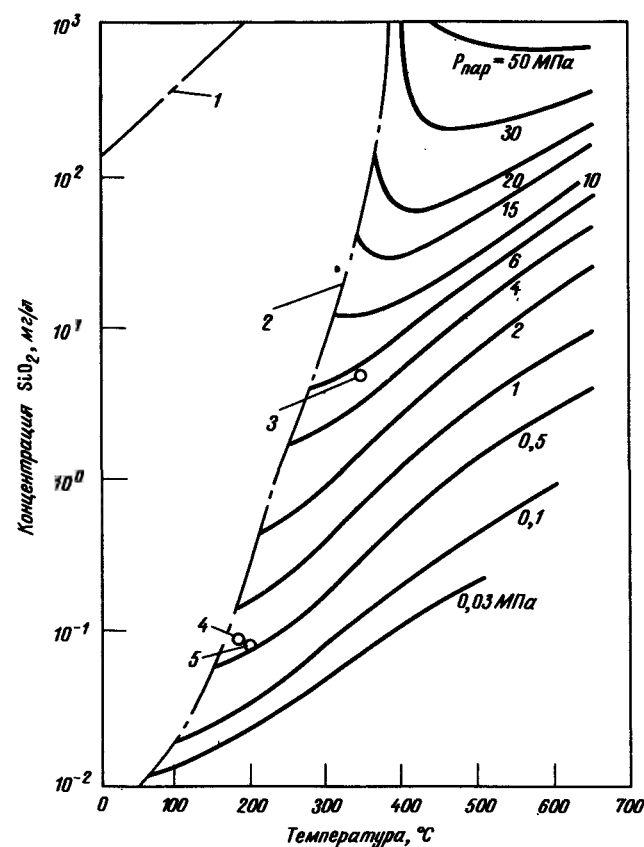
повторную оценку этого метода конденсации, поскольку он обладает рядом технических и экономических преимуществ. Тем временем вариант электростанции, рассмотренный в данной работе, будет включать конденсатор поверхностного типа.

Необходимо отметить, что точность расчетных данных по летучести изотопов, приведенных в табл. 3.9, дает лишь порядок величин. Основная цель заключается в том, чтобы разумно оценить концентрацию летучих радиоактивных изотопов в паре. По мере накопления экспериментальных результатов выводы могут измениться, ^{137}Cs и ^{125}Sb могут оказаться менее летучими, чем ожидается, или по крайней мере проникать в область трубообразной полости в недостаточном количестве, чтобы происходил дальнейший перенос. Другие процессы, которые рассматриваются здесь как температуростойкие, могут в действительности играть значительную роль. Ясно, что все эти сложные химические взаимодействия следует изучить в лабораторных и в натурных условиях, прежде чем они могут быть точно определены.

Выпадение твердых радиоактивных частиц. Потенциальные проблемы, связанные с отложением окиси кремния в турбине и конденсаторе, могут оказаться весьма серьезными. Отложение солей и окиси кремния (и связанная с этим радиоактивность) на лопатках турбины зависит от примесей, присутствующих в паре, и давления пара. Соли, отложившиеся на лопатках паровой турбины, растворимы в воде и при правильной технологии могут смываться водой. Наиболее важными из них являются NaCl , NaOH , силикаты натрия, Na_2CO_3 , а иногда Na_2SO_4 . Отложениями, не растворимыми в воде, чаще всего являются кремниевая кислота, аморфная окись кремния и различные кристаллические формы окиси кремния. Кроме того, могут образоваться нерастворимые в воде отложения окислов железа и CaCO_3 .

Максимально допустимая концентрация в паре окиси кремния, при которой отложения окиси кремния пренебрежимо малы, при давлении пара на входе в турбину 8 МПа составляет $5 \cdot 10^{-6}\%$. Общее количество растворенной твердой фазы (соли и окись кремния) в паре при нормальной работе турбины не должно превышать $(5 - 20) \cdot 10^{-6}\%$. Такая чистота пара трудно достижима даже в лучших бойлерных системах.

Оценка концентрации окиси кремния в паре для применения на ГеоТЭС может быть получена из работы Хейтманна [7], в которой рассматривались силикагель, кремниевая кислота или кварц, находящиеся



Ф и г. 3.11. Концентрации окиси кремния в зависимости от температуры и давления [1].

1 — граница воды, насыщенной паром; 2 — граница пара, насыщенного водой; 3 — условия на входе в турбину ГеоТЭС при использовании ядерного взрыва; 4 — Большие Гейзеры; 5 — Лардереппо.

в равновесии с паром высокого давления. Результаты для силикагеля представлены на фиг. 3.11 в виде сглаженных кривых.

Силикагель и различные кремниевые кислоты взаимно преобразуются в зависимости от температуры и давления пара. Поэтому на фиг. 3.10 между ними не делается различия. По сравнению с силикагелем растворимость кварца в воде меньше от 10 раз при 100 °C до

2 раз при 350 °С. Концентрация летучей окиси кремния в паре ниже для кварца, чем для силикагеля, но разница обычно невелика. Максимальное отношение концентраций достигает двух при температуре ~350 °С и давлении пара 3 – 5 МПа.

Из фиг. 3.10 следует, что концентрация окиси кремния в паре при 623 К и 8 МПа равна 9 мг/л. Следовательно, можно подсчитать, что она составляет 5 – 9 мг/л в условиях подземной полости, поскольку там могут присутствовать либо кварц, либо более активные формы окиси кремния. Очевидно, что содержание окиси кремния при давлении пара, поступающего из этой полости, 8 МПа примерно на два порядка больше допустимого для нормальной работы турбины и что, если подавать пар непосредственно в турбину, на ее лопатках будут накапливаться значительные отложения. Ситуация еще более осложняется присутствием в паре радиоактивности, поскольку ^{125}Sb , ^{137}Cs и ^{134}Cs могут остаться на лопатках турбины вместе с окисью кремния и различными солями.

Месторождения природного пара дают "грязный" пар при более низких температурах и давлениях (фиг. 3.11). Турбинный цикл этих электростанций соответственно имеет более низкий к.п.д., что, однако, компенсируется дешевизной природного пара.

Коррозия и образование накипи. В этом разделе кратко рассматриваются некоторые проблемы коррозии и образования накипи под действием воды и пара, которые могут возникнуть в ходе эксплуатации ГеоТЭС на стимулированной ядерным взрывом геотермальной системе. Большая часть информации, касающейся этих проблем, естественно извлекается из опыта эксплуатации обычных геотермальных скважин. Экстраполирование этой информации на случай геотермальной скважины, стимулированной ядерным взрывом, требует осторожности из-за других параметров пара и других геологических условий, которые можно ожидать в последнем случае.

Сравнение условий в обычных геотермальных скважинах и скважинах, стимулированных ядерным взрывом, показывает, что температура воды в обычной скважине составляет 200 – 300 °С, в то время как в скважине, стимулированной ядерным взрывом, температура породы достигает 350 °С. В обычных скважинах используются трубы диаметром 20 – 25 см, достигающие глубины 0,15 – 0,6 км, а производимый пар находится под давлением 0,3 – 1,2 МПа при температуре 160 – 200 °С в устье скважины. В случае скважины, стимулированной

ядерным взрывом, предполагается использовать трубы диаметром 1,3 – 1,8 м, достигающие глубины ~3 км. Предполагается, что температура и давление в устье скважины будут составлять 350 °С и 8 МПа в момент пуска электростанции и 150 °С и 0,45 МПа к концу работы электростанции.

Чтобы иметь возможность сравнивать явления коррозии и образования накипи в этих двух случаях необходимо оценить количество примесей в породе и теплоносителе обоих типов скважин. Только после этого можно делать какие-то выводы относительно конденсирующихся и неконденсирующихся примесей, которые выносятся потоком пара, и тех химических воздействий, которые эти примеси могут оказать на паротурбинную систему.

Данные химического анализа геотермальных вод Исландии и Новой Зеландии и термальных источников Чили приведены в табл. 3.10, а данные анализа геотермального пара из нескольких источников приведены в табл. 3.11.

Все данные, кроме тех, которые относятся к вулкану Шова-Шиндзян, заимствованы из различных отчетов, помещенных в трудах [8]. Данные для вулкана Шова-Шиндзян заимствованы из работы [9]. Ряд соединений, входящих в незначительных количествах, в таблицу не включен. Представленные типы пород имеют в основном вулканическое происхождение и должны быть сравнимыми с типами пород, в которых производится ядерный взрыв.

Данные табл. 3.10 о количестве растворенных веществ, которые могут образовывать газообразные продукты, не дают представления о действительных концентрациях этих веществ в подземных водах, поступающих в скважину, ввиду потерь, имеющих место в процессе отделения геотермальных вод от пара. В процессе разделения двух фаз летучие компоненты концентрируются в паровой фазе, тогда как нелетучие компоненты концентрируются в воде. Например, фактическое содержание CO_2 в подземных водах геотермального поля Уайракей (Новая Зеландия) составляет 200 – 600 мг/л на глубине, а в подземных водах геотермального поля Уайотапу (Новая Зеландия) 800 – 2500 мг/л, тогда как в табл. 3.10 даны значительно более низкие значения содержания HCO_3^- и CO_3^{2-} .

Из табл. 3.10 и 3.11 видно, что теплоносители содержат значительные количества веществ, вызывающих коррозию и накипь. Аналогичные вещества следует ожидать и в случае использования ядерного взрыва вследствие сходства типов пород. Будут ли коррозия и

Таблица 3.10

Химический анализ геотермальных вод из нескольких источников [1]

	Хен-гидль, Исландия	Кризувик, Исландия	Уайракей, Новая Зеландия	Уайотапу, Новая Зеландия	Татио, Чили	Рейкьявик, Исландия
Максимальная температура источника, °C	230	230	265	295	40–90 ¹⁾	88 ¹⁾
Тип породы	Базальтовая лава	Базальтовая лава	Игнимбриты и пемзовые брекчии	Игнимбриты и пемзовые брекчии	Изверженная порода	Изверженная порода
Общее содержание твердой фазы, мг/л	913	2030	~ 5000	~ 3500	—	285
Na ⁺	174	500	1285	825	—	159
K ⁺	10	68	201	122	—	1,4
NH ₄ ⁺ ²⁾	0,1	0,0	0,2	1,0	—	0,0
Mg ²⁺	0,0	0,5	2,6	3,5	—	0,3
Ca ²⁺	2,8	8,7	12	9	7–28	1,9
H ₃ BO ₃	4,9	9,7	160	85	60–1050	0,3
Al ³⁺	0,4	0,1	—	—	3–19	0,1
Fe ³⁺	0,1	0,0	—	—	3–27	0,0
SiO ₂	283	425	602	470	11–36	126
Cl [—]	152	735	2178	1380	—	30
HCO ₃ [—] ²⁾	24	0	71	145	—	—
CO ₃ ^{2—} ²⁾	57	50	35	106	—	43
SO ₄ ^{2—}	72	87	34	52	—	17
Общее содержание сульфидов, таких, как H ₂ S ²⁾ , мг/л	5,2	7,0	2,4	11	—	0,2

¹⁾ Термальные источники.²⁾ Данные об общем содержании аммиака, двуокиси углерода и H₂S различны в зависимости от метода разделения воды и пара. Значения, полученные путем химического анализа, ниже фактической концентрации в подземной воде.

Таблица 3.11

Данные химического анализа неконденсирующихся газов в геотермальном паре [1]

	Хен-гидль, Исландия	Хвергардир, Исландия	Кризувик, Исландия	Уайракей, Новая Зеландия	Уайотапу, Новая Зеландия	Лардерло, Италия (1870 г.)	Лардерло, Италия (1960 г.)	Большие Гейзеры, Калифорния	Вулкан Шиндзан, Япония	Вулкан Шиндзан, Япония
Максимальная температура источника, °C	230	230	230	265	295	—	245	> 205	—	—
Температура в устье скважины, °C	~ 160	~ 160	~ 160	~ 195	—	—	180–200	175	194	328
Содержание неконденсирующихся газов в общем расходе, вес. %	0,3	0,1	1,3	0,01–0,5	0,07–0,2	—	4,5	0,7	0,8	2,2
CO ₂ (молен. %)	84,6	78,5	83,9	93,0	90,0	90,5	92,4	69,3	69,4	84,9
H ₂ (молен. %)	2,1	1,1	5,4	0,8	1,5	2,0	1,4	12,7	12,4	6,6
H ₂ S (молен. %)	4,9	17,2	9,8	3,8	7,8	4,2	2,5	3,0	3,9	1,0
CH ₄ (молен. %)	0,0	—	0,1	0,8	0,3	1,4	1,0	11,8	0,1	0,1
NH ₃ (молен. %)	—	—	—	~ 0,2	~ 0,2	—	1,7	1,6	0,0	0,0
N ₂ (молен. %)	8,4	3,2	1,0	—	—	1,9	0,6	1,6	9,1	5,2
Остальное	—	—	—	—	—	—	0,4 ¹⁾	—	5,1 ²⁾	2,2 ²⁾

¹⁾ В основном H₃BO₃.²⁾ В основном HCl с малыми количествами HF и SO₂.

образование накипи имеет место в действительности, зависит от конкретных условий в каждом случае. Как известно, хлориды, NH_3 , CO_2 и H_2S в некоторых случаях вызывают коррозию металлов. Пар и горячая вода являются коррозионно-активными по отношению ко всем силикатным материалам, таким, как цементированные соединения труб, железобетонные трубы или емкости, керамические отстойники и тому подобное. Следует либо избегать этих материалов, либо применять соответствующие покрытия.

Накипь (или отложения) могут образоваться в трубах, турбинах или конденсаторах вследствие присутствия в паре летучих примесей, таких, как хлориды, гидроокислы, карбонаты, сульфаты и силикаты щелочных металлов, карбонат кальция и окись кремния.

Неконденсирующиеся примеси в паре, такие, как CO_2 , H_2S , H_2 , CH_4 и т.п., не обязательно вызывают коррозию, однако их необходимо отводить на выходе из турбины, чтобы обеспечить ее эффективную работу.

О коррозионной стойкости обычных сплавов и других материалов в среде геотермального флюида известно мало. Наиболее коррозионно-стойкими являются сплавы на основе титана, аустенитные нержавеющие и хромированные стали. Эпоксидные смолы являются коррозионно-стойкими до температур 100°C . Были проведены эксперименты, продолжительностью до 150 сут по воздействию на образцы сплавов воды при температурах $50 - 240^\circ\text{C}$ и пара при температурах $100 - 200^\circ\text{C}$.

Хотя был обнаружен широкий спектр различных механизмов коррозии, по-видимому, наиболее серьезную опасность для сплавов представляет коррозия под напряжением. Известно, что такая коррозия может быть вызвана незначительными количествами либо хлоридов, либо сульфидов и может привести к образованию трещин в различных сплавах, которые используются в конструкциях турбин. Концентрации хлоридов $5 \cdot 10^{-4}\%$ и температуры 50°C уже достаточно, чтобы вызвать эту коррозию.

Присутствие кислорода убыстряет процесс коррозии под напряжением. Для образования трещин не существует нижнего предела напряжения. Трещинообразование под действием сульфидов может происходить в присутствии H_2S при температурах до 190°C . Присутствие H_2S приводит также к явлению, известному как водородное внедрение, которое может привести к охрупчиванию, образованию раковин и трещин в нержавеющих сталях.

Из других механизмов коррозии следует упомянуть химическую коррозию и механическую эрозию. Химическая коррозия может протекать в присутствии NH_3 , H_2S , CO_2 и хлоридов в геотермальном паре. В отдельных случаях, как это было в начале работы электростанции "Большие Гейзеры", в качестве коррозионно-активного агента также может присутствовать ртуть. Как правило, при наличии воздуха коррозионная активность этих химических веществ повышается. Химическую коррозию можно свести к минимуму или избежать ее в большинстве обычных геотермальных электростанций путем соответствующего выбора сплавов и предотвращения доступа воздуха. Однако химическая коррозия может представлять собой серьезную проблему в случае более высоких температур и давлений, которые будут иметь место при использовании ядерных взрывов.

С проблемой механической эрозии сталкиваются в том случае, когда высокоскоростная струя влажного пара ударяет в лопатки турбины. Такое соударение может привести к комбинированному коррозионно-эрозионному процессу, который может вызвать серьезное повреждение лопаток турбины. Весьма эффективно противостоят эрозии нержавеющие стали с содержанием хрома 13%.

Из опыта, полученного при эксплуатации геотермальных станций на природном теплоносителе, следует, что, по всей вероятности, с подобными проблемами придется столкнуться в случае использования ядерного взрыва. Эти проблемы можно исследовать путем проведения экспериментов по воздействию геотермального пара и воды на образцы сплавов в тех же условиях, что и при использовании ядерных взрывов. Важно, чтобы в таких экспериментах пар и вода по составу принадлежали бы вполне определенной геотермальной формации. Лучше всего было бы исследовать пар, взятый непосредственно из скважины в месте, где был заложен ядерный заряд, или при отсутствии действующей скважины можно получить представление о примесях, ожидаемых в паре, из анализов образцов кернов, взятых из формации. По всей видимости, как и в случае использования обычных геотермальных скважин, только с помощью таких опытов можно найти приемлемые сплавы и другие конструкционные материалы.

Очистка пара. Если геотермальный пар будет использован непосредственно в турбине, работающей при высоких давлениях, то, по всей вероятности, потребуются его очистка, чтобы избежать неэффективной работы турбины и высокого уровня радиации. Для удаления кремнезема могут оказаться эффективными раздробленные известняк

или доломит, действующие как скребок. Промывка пара едким натром NaOH также может быть эффективной, но на эту операцию требуется время, и, кроме того, придется следить за тем, чтобы не повредить турбину.

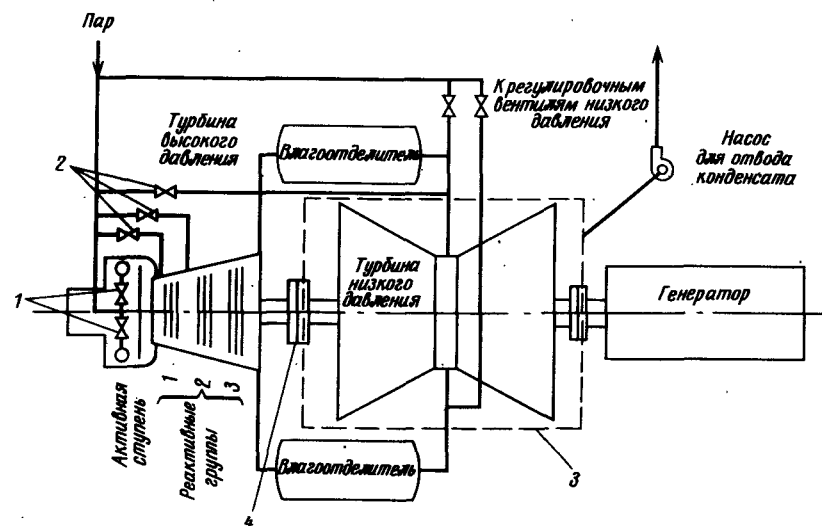
Другим решением проблемы является введение теплообменника, в котором пар, поступающий из трещиноватой области, будет конденсироваться, а вода будет испаряться. Хотя это дополнительное оборудование уменьшит термический к.п.д. процесса, оно обеспечит концентрирование накипи и радиоактивных продуктов. Экономическая выгода такого подхода заключается в возможности использования в остальной части электростанции стандартного оборудования. Если накипеобразование в теплообменнике окажется чрезмерно сильным, можно использовать два теплообменника, а также химический или механический способы удаления накипи.

Если пар очищают, то все загрязняющие его компоненты задерживаются в системах очистки. Удаление загрязняющих веществ и радиоактивности из системы очистки можно осуществлять закачкой в трещиноватую область, если в системе очистки используется жидкость. Необходимость очистки пара, методы удаления загрязняющих компонентов, извлеченных из него, и стоимость этого процесса подлежат дальнейшему изучению.

ТЕРМОДИНАМИКА СИСТЕМЫ

Термодинамически система может характеризоваться условиями в трещиноватой области, потерями в процессе передачи тепла от трещиноватой области к турбине и условиями на входе в турбину. В этой главе описана турбина с заданным условием на входе и различными системами передачи тепла с присущими им термодинамическими потерями.

Характеристики турбины. Турбина рассматриваемой электростанции должна удовлетворять необычным и разным условиям. Источник тепла производит пар различного качества, химического и газового состава, с различным уровнем радиоактивного загрязнения. Хотя поддержание постоянной выходной мощности в течение всего срока службы электростанции весьма желательно, при изменении давления пара и его температуры в широких пределах эта задача становится трудноразрешимой. Рассматриваемая турбина сильно отличается по конструкции от применяемых в настоящее время на обычных теплоэлектростанциях, напоминая скорее турбины, использованные на военных

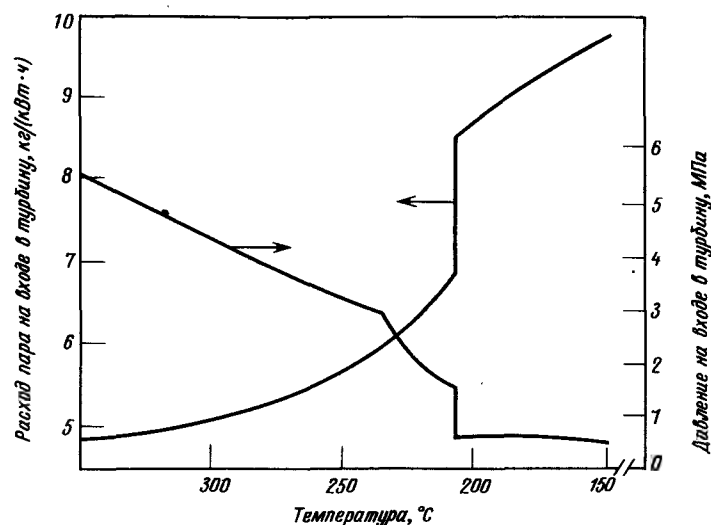


Ф и г. 3.12. Теплосиловая установка ГеотЭС [1].

1 — регулировочные сопловые ventили; 2 — регулировочные ventили байпасной линии; 3 — конденсатор (внизу); 4 — муфта сцепления.

кораблях во время второй мировой войны. На фиг. 3.12 схематически показана теплосиловая установка с двумя турбинами, из которых одна высокого давления, другая низкого давления (в реальном устройстве необходимо иметь две турбины низкого давления, чтобы пропустить весь пар, проходящий через установку). После частичного расширения в турбине высокого давления пар поступает в сепаратор, где от него отделяется почти вся влага, и затем в турбину низкого давления. Дополнительного подогрева пара после сепаратора не производится, так как это не оправдывает дополнительных затрат.

Турбина высокого давления имеет первую ступень, пропускающую часть пара, и впускные клапаны на байпасных линиях, пропускающие остальную часть пара к первой и второй реактивным группам, а также коллекторы пара низкого давления. Первоначально желательно впускать пар с давлением 5,52 МПа и температурой 340 °С (фиг. 3.13) в активную ступень турбины через половину ее фронтальной площади. По мере остывания геотермального источника поток питательной воды необходимо регулировать таким образом, чтобы пар при сниже-



Ф и г. 3.13. Характеристики турбины ГеотЭС [1].

нии давления и температуры поступал при давлении насыщения 2,93 МПа.

В турбине для пропускания возрастающего объемного расхода пара приспособлен кольцевой вход, представляющий собой дугу окружности, которую можно увеличивать до 360°.

После этого пар начинает поступать в линию, обходящую активную ступень турбины, и это продолжается до тех пор, пока не начнет поступление пара в линию, обходящую первую реактивную группу, по мере понижения давления и температуры пара до 1,55 МПа и 200 °С.

Затем выпуск пара осуществляется непосредственно в турбину низкого давления, в обход турбины высокого давления и сепаратора. Турбина высокого давления отключается, чтобы предотвратить потери на трение и возможные повреждения.

Поступление питательной воды регулируется таким образом, чтобы обеспечить пар с параметрами 0,57 МПа и 200 °С. Чтобы получить возрастающий поток пара, необходимо увеличить давление до 0,62 МПа, поскольку температура непрерывно падает и перегрев уменьшается. После этого давление и температура падают, так же как и выходная мощность, до тех пор, пока не будут достигнуты конечные значения

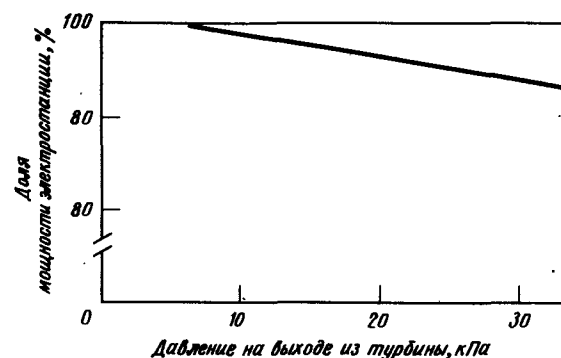
параметров $p = 0,46$ МПа, $t = 150$ °С и $W = 150$ МВт. На станции не используются подогреватели питательной воды по тем же причинам, что и подогреватели пара, которые не могут оправдать дополнительных капитальных затрат.

Расход пара для станции мощностью 200 МВт вначале составляет 275 кг/с, а в конце цикла при нагрузке 150 МВт он возрастает до 450 кг/с. В отличие от обычной электростанции, где только половина дросселируемого пара поступает в конденсатор (другая половина используется для регенеративного подогрева питательной воды), в данной турбине весь пар проходит через последние ступени турбины и поступает в конденсатор. В результате необходимо вдвое увеличивать площадь кольцевого сечения на выходе из турбины.

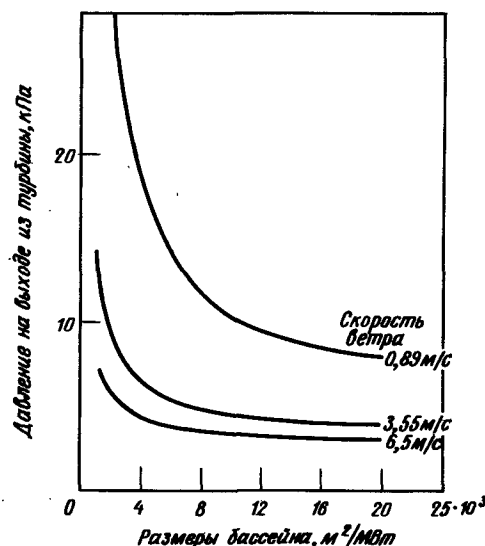
Предполагается, что геотермальная электростанция строится в удаленном районе, где земли сравнительно дешевы, а строительство таких сооружений, как градирни, дороже, чем обычно. Поэтому для охлаждения конденсата лучше использовать охлаждающий бассейн. В данном исследовании предполагалось, что давление в конденсаторе составляет 0,13 МПа. В реальном устройстве давление в конденсаторе желательно оптимизировать, принимая во внимание экономический баланс между его влиянием на производство энергии, стоимость конденсатора, размеры (стоимость) бассейна для охлаждения конденсата и требования к воде, которые в данном проекте будут иметь решающее значение.

На фиг. 3.14 представлен типичный график, отражающий влияние, которое оказывает давление в конденсаторе на выходную мощность турбогенератора при заданном давлении на входе в турбину. Поскольку, согласно данному проекту, давление на входе изменяется постепенно, расчеты усложнятся. Фактическое влияние давления в конденсаторе, по-видимому, будет большим, чем это следует из фиг. 3.14.

На фиг. 3.15 представлено типичное семейство кривых, описывающих связь между давлением на выходе из турбины, в конденсаторе, и размером охлаждающего бассейна с учетом скорости ветра в качестве одного из параметров. Не показаны, но учитывались при расчетах, влияние относительной влажности, температуры окружающей среды по сухому термометру, облачности, температуры воды в бассейне, температуры на выходе из конденсатора и расхода охлаждающей воды. Для данной электростанции рекомендуемые размеры бассейна следующие: $4 \cdot 10^3$ м²/МВт или $8 \cdot 10^5$ м² со средней глуби-



Ф и г. 3.14. Зависимость выходной мощности турбогенератора от давления на выходе из турбины [1].



Ф и г. 3.15. Требования к бассейну для охлаждения конденсата [1].

ной 1,2 м. Ожидается, что потребуется восполнение воды за счет осадков в количестве 180 см в год, или $2,7 \cdot 10^8$ м³. На фигуре не нашли отражение другие требования, связанные с работой электростанции, например требования к начальному оборудованию паровых скважин.

Циклы с кипящей водой и с водой, находящейся под давлением.

Рассматривались два метода переноса тепла от трещиноватой геотермальной породы к турбине: цикл с водой под давлением (ЦВД) и цикл с кипящей водой (ЦКВ). В цикле с водой под давлением вся полость полностью заполняется водой и поддерживается при высоком давлении, чтобы не начиналось кипение. В первичном контуре вода механически прокачивается через трещиноватую область и подается в теплообменник (котел), а затем снова возвращается в трещиноватую область. Во вторичном контуре пар образуется в котле и затем поступает в турбину.

В цикле с кипящей водой в трещиноватой области образуется поверхность раздела пар — вода. Питательная вода подводится к нижней части трещиноватой области и по мере прохождения через нее превращается в пар. Этот пар подается непосредственно в турбину, а конденсат возвращается в трещиноватую область. В течение эксплуатации системы трещиноватая область будет постепенно заполняться водой.

Циклы ЦВД и ЦКВ имеют много общего. Основные потери в обеих системах связаны с трением при протекании потока в трубопроводе и в трещиноватой области. Из-за изменяющихся условий образования пара необходимо рассчитывать любое устройство на наиболее тяжелый режим работы как в начале, так и в конце эксплуатации; например, любой паропровод должен быть рассчитан таким образом, чтобы он мог выдерживать высокие давления пара на начальном этапе эксплуатации и был бы способен пропустить большие расходы пара в конце эксплуатации. Основой для сравнения этих двух систем являются образование накипи и связанная с этим радиоактивность, а также стоимости насосов, трубопровода и теплообменника. В ЦВД используется котел для производства относительно чистого пара, который поступает затем в турбину и конденсатор. Следовательно, могут использоваться стандартные турбина и конденсатор. Однако для котла потребуются большие допуски на размеры и специальные материалы для компенсации значительного накипобразования. Кроме того, поскольку условия дросселирования со временем ухудшаются, количество тепла, передаваемое в конденсатор, возрастает к концу цикла в два с половиной раза, что также требует увеличения размеров котла.

Безусловно, энергия, требуемая для прокачки в ЦВД, зависит от размера используемого трубопровода. Любая система должна быть оптимизирована для обеспечения баланса между энергией на прокачку,

размером трубопровода и размером котла. Для рассматриваемой электростанции энергия на прокачку не должна превышать 10% от полезной мощности электростанции при допустимых размерах трубопровода.

При использовании ЦКВ уменьшается количество накипи и радиоактивности, которые выносятся на поверхность летучими газами и небольшим количеством других материалов, которые выносятся паром или растворены в паре. Примеси, которые достигают поверхности в ЦКВ, должны пройти через турбину и конденсатор поверхностного типа и должны быть возвращены с конденсатом в трещиноватую область. Первостепенную важность приобретают корродирующее воздействие геотермального пара на турбину и образование накипи.

До дросселирования в турбине необходимо обеспечить довольно тщательную очистку пара. Как и в случае котла в ЦВД, конденсатор в ЦКВ должен быть сконструирован с запасом для обеспечения дополнительной передачи тепла на конечном этапе эксплуатации. Геотермальный пар также может иметь относительно высокое содержание неконденсирующихся газов. При содержании 1 вес.% газа в паре потребуется увеличение площади поверхности на 50% по сравнению с поверхностью стандартного конденсатора. Кроме того, потребуется применение конструкций из нержавеющей стали и увеличение размеров трубы, учитывающее последующее накипеобразование, с тем, чтобы увеличить периоды действия установки между операциями очистки труб.

В ЦКВ статическое давление в линии с питательной водой обеспечивает давление в системе. Поскольку основные термодинамические потери в ЦКВ являются функцией потерь в трубопроводе, концом эксплуатации полости считается тот момент, когда давление насыщения пара при температуре на выходе из полости станет равным перепаду давлений в трубопроводе плюс давление на входе в турбину.

Предварительные анализы ЦКВ и ЦВД показывают, что оба они технически возможны. В ЦВД для первичного контура необходимы насосы и парогенератор, но, с другой стороны, при использовании этого метода требуется меньшая выхлопная линия и можно работать с чистым вторичным контуром, в котором можно использовать недорогой барометрический конденсатор. Экономические преимущества одной системы перед другой не ясны, однако если перенос радиоактивности и кремнезема на поверхности теплообменника в ЦВД окажется значительным, использование ЦКВ позволит уменьшить этот перенос на

много порядков. Это обусловлено низкой растворимостью всех веществ в паровой фазе. Именно по этой причине ЦКВ был выбран для детального анализа.

Анализ потерь в системе. При проектировании системы транспортировки пара для ЦКВ ухудшение его термодинамических характеристик в трубах должно компенсироваться применением труб большего диаметра с учетом стоимости. Существуют многочисленные схемы трубопроводов. Простейшей системой является трубопровод с толщиной стенки, достаточной для выдерживания давления на начальном этапе эксплуатации, и с диаметром, достаточным для поддержания массового расхода в конце эксплуатации без чрезмерного увеличения перепада давлений. Вместо этой системы можно использовать линию высокого давления и малого диаметра для работы в начале эксплуатации и линию низкого давления и большого диаметра для работы в конце эксплуатации.

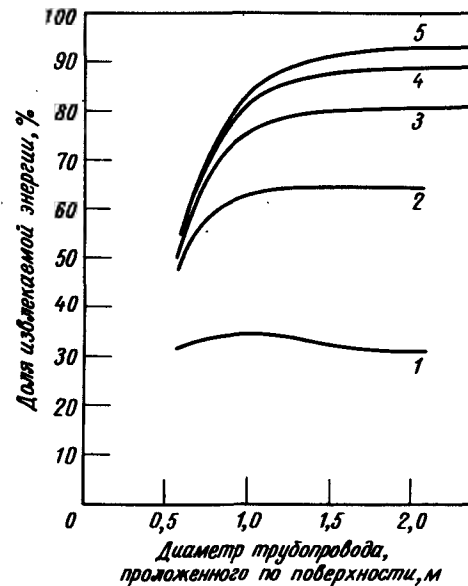
Для выполнения детального параметрического анализа различных систем трубопроводов в случае цикла с кипящей водой была составлена программа для вычислительной машины, с тем чтобы рассчитать давления и температуры в различных точках системы, соответствующие данным условиям дросселирования (давление, энтальпия, массовый расход) и размерам трубопровода. Перепады давлений в трубопроводах были рассчитаны с использованием хорошо известного соотношения Му迪 с численным коэффициентом 0,02. Перепад давлений в объеме, от которого отбирается тепло, рассчитывался с помощью закона Дарси в предположении цилиндрической геометрии и проницаемости 0,5 дарси. Расчеты были выполнены для интервала параметров, представленных в табл. 3.12.

Влияние диаметра трубопровода на величину энергии, которую можно извлечь из трещиноватой области, показано на фиг. 3.16. Эти кривые были рассчитаны для идентичных условий дросселирования и длин трубопроводов. Для стопроцентного отбора энергии средняя конечная температура трещиноватой породы должна быть равной конечной температуре дросселирования. Безусловно, что при наличии описанных выше потерь в системе 100%-ный отбор тепла никогда не будет обеспечен. Эти кривые указывают, что для данного диаметра выводящего трубопровода существует максимум извлекаемой энергии. Этот максимум не зависит от диаметра поверхностного трубопровода; при диаметре выводящего трубопровода 900 мм максимум соответствует диаметру трубопровода на поверхности свыше 1350 мм. Подобное

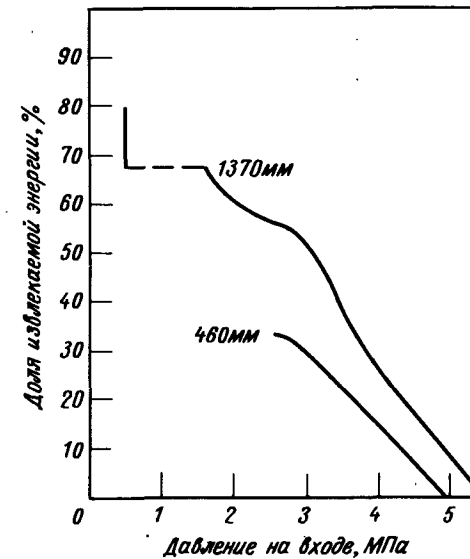
Таблица 3.12

Интервалы параметров, для которых были выполнены расчеты

Параметры	Значения
Условия дросселирования	
Давление, МПа	15,8 – 0,34
Энтальпия, МДж/кг	3,1 – 2,72
Массовый расход, кг/с	252 – 504
Трубопровод на поверхности	
Длина, км	0,61 – 9,65
Диаметр, м	0,46 – 2,44
Вертикальный трубопровод	
Длина, км	2,6 – 2,8
Диаметр, м	0,61 – 1,83



Ф и г. 3.16. Доля извлекаемой энергии в зависимости от диаметра трубопровода, проложенного по поверхности [1].
Диаметр выводящего трубопровода: 1 — 610 мм; 2 — 915 мм; 3 — 1220 мм; 4 — 1525 мм; 5 — 1830 мм.



Ф и г. 3.17. Доля извлекаемой энергии в зависимости от давления дросселирования [1].

этому семейство кривых можно получить для каждого набора условий дросселирования и длин трубопроводов. Эти кривые дают необходимую информацию для выбора системы трубопроводов, обеспечивающей минимальные энергетические затраты.

На фиг. 3.17 представлены относительные значения энергии, извлекаемой из полости на разных стадиях работы турбины. Эти две кривые были рассчитаны для идентичных условий дросселирования и длин трубопроводов. Кривая, соответствующая диаметру 460 мм на фиг. 3.17, заканчивается при давлении дросселирования 2,5 МПа и значении отбираемой энергии 33,5%. Физически это означает, что при данных массовых расходах и длинах трубопровода, которые использовались в расчетах, нельзя получить давления дросселирования менее 2,2 МПа из-за того, что в трубопроводе диаметром 460 мм слишком велик перепад давлений, обусловленный трением. (Отметим, что с уменьшением давления дросселирования массовый расход должен увеличиться, как это показано на фиг. 3.13.)

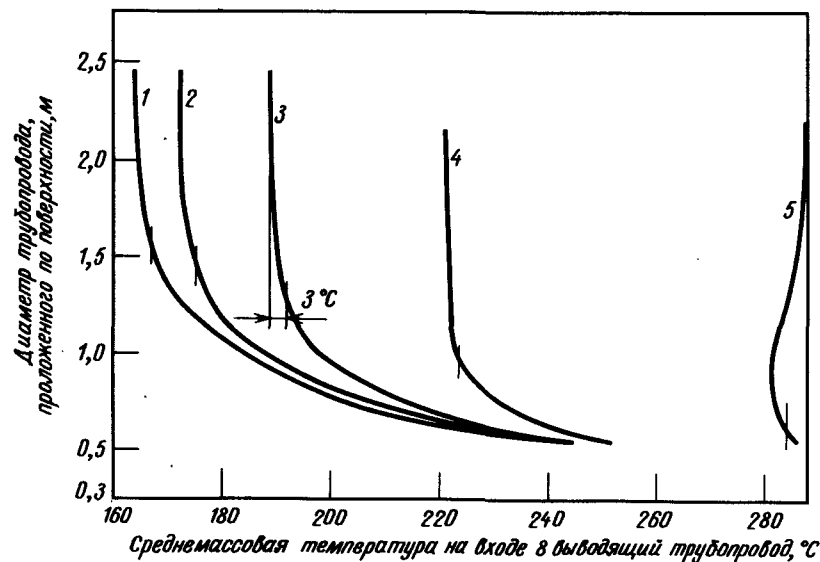
Используя трубопровод диаметром 1370 мм можно достичь конечного давления дросселирования 0,48 МПа. Вертикальный отрезок

кривой для диаметра трубопровода 1370 мм представляет собой конечную фазу эксплуатации электростанции. Во время этого последнего периода используется $\sim 15\%$ энергии, извлекаемой из трещиноватой области.

Потери, связанные с сооружением электростанции до взрыва.

Одним из основных преимуществ сооружения электростанции до взрыва является то, что турбогенераторная установка может быть передвинута непосредственно к эксплуатационной скважине, пробуренной в полость, что позволит свести к минимуму термодинамические потери и стоимость сооружения трубопровода. Для рассматриваемой электростанции приемлемым является расстояние 600 м.

Общее количество энергии, которое можно извлечь в результате взрыва данной системы зарядов за период эксплуатации данного геотермального источника, можно оценить по среднемассовой температуре теплоносителя в конце эксплуатации. Работа турбины прекращается при достижении следующих параметров пара на входе: 0,483 МПа



Ф и Г. 3.18. Среднемассовая температура теплоносителя для различных систем трубопровода [1].

Длина трубопровода, проложенного по поверхности, 600 м; условия на входе в турбину: 0,483 МПа и 150 °С; диаметры выводящего трубопровода: 1 — 1830 мм; 2 — 1525 мм; 3 — 1220 мм; 4 — 915 мм; 5 — 610 мм.

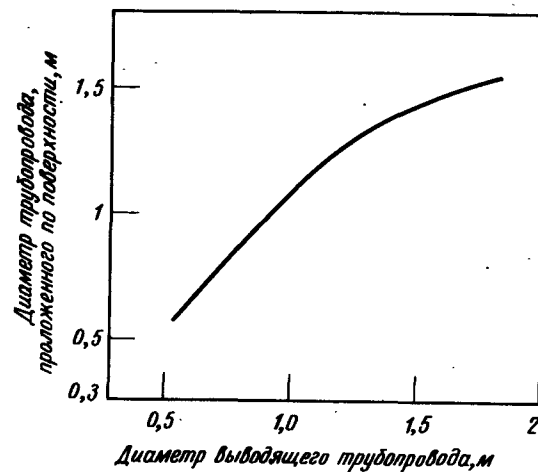
и 150 °С. Температуры породы в источнике в конце его эксплуатации представлены на фиг. 3.18. Если принять, что среднемассовая температура рабочей жидкости прямо пропорциональна средней температуре трещиноватой породы, то, согласно фиг. 3.18, при более низких температурах из полости извлекается большее количество энергии. Как можно было ожидать, чем больше диаметр выводящих трубопроводов и трубопроводов на поверхности, тем ниже конечная температура, при которой из полости прекращается извлечение тепла, и, следовательно, тем больше количество извлеченного тепла.

Из-за потерь в трубопроводе температура теплоносителя на входе в выводящий трубопровод отличается от температуры на входе в турбину.

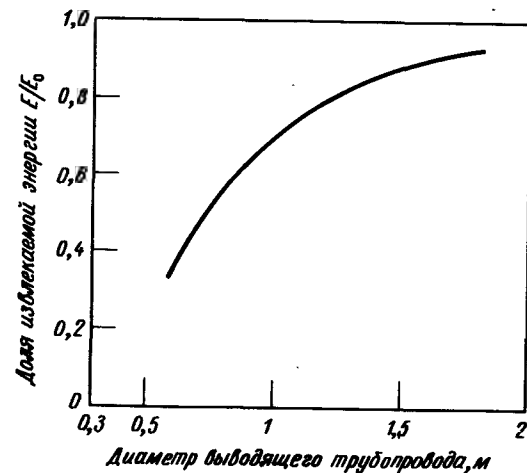
Суммарные потери можно разделить на потери в трубопроводе, находящемся на поверхности, и потери в выводящем трубопроводе. Следовательно, при данном диаметре выводящего трубопровода увеличение размера трубопровода, расположенного на поверхности, сверх того размера, при котором потери пренебрежимо малы, не позволит извлекать энергию при более низких температурах источника (фиг. 3.18). Следовательно, кривые асимптотически приближаются к тем температурам источника, которые дают представление только о потерях в выводящем трубопроводе.

Вместо того чтобы для каждого размера выводящего трубопровода подбирать подходящий диаметр трубопровода на поверхности, оказалось возможным найти разумные соотношения, выбирая диаметр трубопровода на поверхности таким, чтобы температура источника отличалась не более чем на 3 °С от асимптотической температуры источника. Такое соотношение показано на фиг. 3.19.

Каждой системе трубопроводов, представленных на фиг. 3.19, соответствует определенная конечная температура источника. Это в свою очередь означает, что с помощью каждой системы из геотермального источника можно извлечь свое количество тепла. Если предположить для сравнения, что одна единица энергии извлекается при снижении температуры породы от 350 до 150 °С, то относительное количество извлекаемой энергии с помощью различных систем трубопроводов можно получить из фиг. 3.18 и 3.19. Результаты представлены на фиг. 3.20, где приведены рабочие характеристики различных систем трубопроводов. Наряду с общим запасом энергии и стоимостью систем трубопроводов, а также других расходов, связанных с разработкой поля, эти характеристики являются основой для выбора системы трубопроводов в рассматриваемом проекте.



Ф и г. 3.19. Оптимальный диаметр трубопровода, проложенного по поверхности, в зависимости от диаметра выводящего трубопровода [1].
Длина трубопровода, проложенного по поверхности, 600 м; условия на входе в турбину: 0,483 МПа и 150 °С.

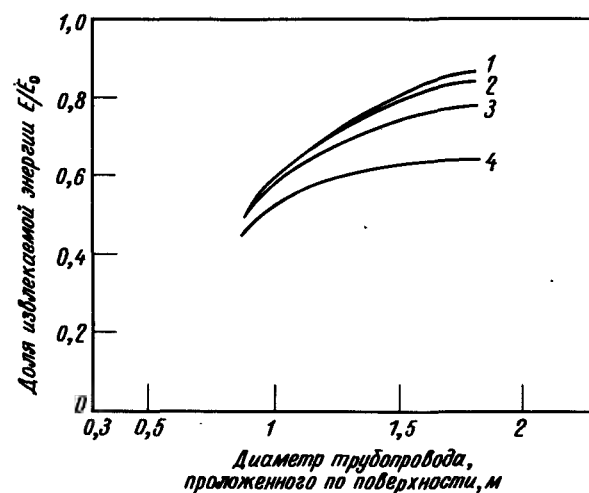


Ф и г. 3.20. Доля извлекаемой энергии в зависимости от диаметра выводящего трубопровода [1].
Длина трубопровода, проложенного по поверхности 600 м; условия на входе в турбину: 0,483 МПа и 150 °С.

Потери, связанные с конструкцией сейсмостойкой станции. Термодинамические характеристики системы преобразования энергии для сейсмостойкой конструкции электростанции такие же, как и для рассматриваемой геотермальной электростанции, которую можно считать стандартной, но потери в трубопроводах в течение последних 20 лет эксплуатации для размещенной в отдалении сейсмически усиленной электростанции резко отличны. В течение первых 10 лет эксплуатации электростанции тепло передается на расстояние 600 м по трубопроводу, проложенному по поверхности, и потери в нем будут аналогичны потерям в рассмотренном выше случае строительства до взрыва.

Рассмотрим теперь термодинамические характеристики для нескольких комбинаций диаметров выводящего (вертикального) трубопровода и трубопровода, проложенного по поверхности, по которым пар из полости поступает к электростанции, расположенной на расстоянии 6,4 км. Для облегчения выбора комбинации диаметров выводящего трубопровода и трубопровода, проложенного по поверхности, оценивается температура основной массы теплоносителя на выходе из источника при условиях на входе в турбину в конце ее эксплуатации. По этой температуре можно определить относительное количество энергии, извлекаемой из данного геотермального поля с помощью различных систем трубопроводов. Необходима некоторая корректировка методов, используемых при расчете строительства электростанции до взрыва.

В предыдущем анализе диаметр трубопровода, проложенного по поверхности, был произвольно увеличен, так что среднемассовая температура теплоносителя на выходе из источника отличалась от температуры, достигаемой при использовании только выводящего трубопровода, не более чем на 3 °С. Это позволило получить соотношение между диаметром трубопровода на поверхности и диаметром выводящего трубопровода, которое упростило последующие расчеты. Для каждого случая, с учетом стоимости трубопровода большого диаметра длиной 6,4 км, необходимо оптимизировать диаметр трубопровода, проложенного по поверхности. На фиг. 3.21 показано относительное количество энергии, извлекаемое различными системами трубопроводов, рассмотренных в расчетах по оптимизации конструкции электростанции, построенной после взрыва. Наряду с общим запасом энергии (E_0) и стоимостью различных систем трубопроводов, а также



Ф и г. 3.21. Доля извлекаемой энергии [1].

Длина трубопровода, проложенного по поверхности, 6,4 км; условия на входе в турбину: 0,483 МПа и 150 °С; диаметры выводящего трубопровода: 1 — 1830 мм; 2 — 1525 мм; 3 — 1220 мм; 4 — 915 мм.

других расходов, связанных с разработкой поля, эти данные являются основой для выбора системы.

ГИПОТЕТИЧЕСКИЙ СЛУЧАЙ ВЫБРОСА

Был проведен анализ гипотетического случая выброса. Предполагалось, что энергетическая установка находится на расстоянии 6,4 км от геотермального поля и что разрыв произошел в середине трубопровода, проложенного на поверхности. После того как датчиком давления была обнаружена утечка (6 с), быстродействующие клапаны с обоих концов трубы закрыли систему за следующие 15 с. Предполагалось, что разрыв имеет такой же диаметр, что и трубопровод, и расположен на верхней стороне трубы. Были проведены расчеты для труб как высокого давления (диаметр трубы 457 мм), так и низкого давления (диаметр трубы 1370 мм). Хотя для этих двух случаев получены различные цифры, выводы можно сделать одинаковые.

В табл. 3.13 приведена сводка условий, при которых произошел разрыв. Предполагалось, что в конце истечения пара давление в трубе равно 0,1 МПа, а температура 100 °С. Разрыв расположен на верхней стороне трубы, и поток пара направлен вверх.

Таблица 3.13

Условия разрыва паропровода [1]

Длина трубопровода 6,4 км, диаметр трубы 457 мм;
время срабатывания клапанов 15 с; скорость ветра 3 м/с.

Параметр	
Температура на входе, °С	349
Давление на входе, МПа	7,35
Давление в турбине, МПа	5
Средняя температура, °С	349
Среднее давление, МПа	6,1
Средняя скорость звука в паре ($\gamma = 1,28$), м/с	606
Время, необходимов для обнаружения падения давления на расстоянии 3,2 км от разрыва, с	6,0
Полное время перекрытия системы, с	21
Объем трубы длиной 6,4 км, м ³	1060
Средняя плотность пара в трубе длиной 6,4 км, г/м ³	24600
Расход пара при мощности 160 МВт, г/с	$2,18 \cdot 10^5$
Плотность пара при давлении 0,1 МПа и температуре 100 °С, г/м ³	597
Масса потока перед перекрытием системы, г	$0,46 \cdot 10^7$
Масса утечки при снижении давления в трубе до 0,1 МПа (конденсация отсутствует), г	$2,54 \cdot 10^7$
Полная масса утечки, г	$3 \cdot 10^7$
Начальный расход при истечении в атмосферу со скоростью звука (330 м/с), г/с	$1,3 \cdot 10^6$
Полное время выброса в предположении постоянного расхода, с	22
Начальный тепловой поток ($C_p = 2$ кДж/(кг · К), $T_e = 15$ °С), МДж/с	0,879
Высота струи в конце времени выброса, м	190
Высота на расстоянии переноса при условии, что султан пара непрерывен, м	1370
Принятая высота стабилизации, м	600
Принятый диаметр стабилизации, м	60
Объем, м ³	$1,7 \cdot 10^6$

Существует два вида метеорологических проблем, связанных с выбросом такого типа: 1) траектория средней линии султана пара и 2) диффузия вещества вокруг этой линии. Была рассчитана высота султана пара в конце выброса, однако это значение было сочтено слишком малым, так как пар продолжает подниматься и после окончания выброса. Точно также равновесная высота для непрерывного точечного источника (при начальных значениях потоков тепла и импульса)

Таблица 3.14

Радиоактивность в паре через 6 мес после взрыва [1]

Ядерный взрыв			Термоядерный взрыв	
изотоп	активность, кКи	концентрация в паре, пКи/г	активность, кКи	концентрация в паре, пКи/г
^3H	220	4,4(5) ¹⁾	20 290	4,1(7)
^{125}Sb	60	1,2(5)	0,18	3,6(2)
^{127}Te	90	1,8(5)	0,27	5,4(2)
^{134}Cs	14	2,8(3)	18	3,6(3)
^{137}Cs	180	3,6(4)	0,54	1,1(2)

¹⁾ 4,4(5) = $4,4 \cdot 10^5$ пКи/г.

П р и м е ч а н и е. Предполагается, что все 100% активности равномерно распределены по всему объему воды ($5 \cdot 10^5 \text{ м}^3$), за исключением ^{134}Cs и ^{137}Cs . Для этих двух изотопов предполагается, что 10% активности переходит в раствор.

была сочтена слишком большой, поскольку начальные потоки не будут сохраняться в течение всего времени выброса. Были выбраны промежуточные значения высоты 600 и 1200 м для труб диаметром 457 и 1370 мм соответственно. Для горизонтального или направленного вниз выброса ожидалась бы меньшая высота.

Через 6 мес после ядерного взрыва многие изотопы распадаются до незначительных количеств. Из оставшихся только некоторые считаются растворимыми. Они перечислены в табл. 3.14. Предполагалось, что перед разрывом они равномерно распределены по всему объему воды и что неконденсирующиеся газы (^{85}Kr и ^{37}Ar) уже улетучились. Окончательные концентрации радиоактивных изотопов в воде также приведены в табл. 3.14.

Расстояние от средней линии до границы турбулентной струи составляет ~10% расстояния от сопла. Поэтому первоначально облако имеет форму конуса. Для простоты этот объем предполагался цилиндром с радиусом, равным 5% высоты. Предполагалось также, что вынесенная активность равномерно распределена по объему. Это дает умеренную концентрацию на уровне земли по двум причинам: 1) скорость выноса активности максимальна в момент разрыва, поэтому пропорционально большая активность будет иметь место на больших высотах; 2) при указанном предположении, в соответствии с которым ширина

Таблица 3.15

Выброс радиоактивности при разрыве трубопровода диаметром 457 мм [1]

Изотоп	Деление	Синтез
	активность, пКи	
^3H	1,3(13) ¹⁾	1,2(15)
^{125}Sb	3,5(12)	1,1(10)
^{127}Te	3,5(12)	1,6(10)
^{134}Cs	8,0(10)	1,1(11)
^{137}Cs	1,1(12)	3,3(9)

¹⁾ 1,3(13) = $1,3 \cdot 10^{13}$ пКи.

облака на уровне земли больше ожидаемой, суммарные концентрации активности за время прохождения этого облака завышены.

Следует отметить, что здесь пренебрегалось уменьшением концентрации за счет конденсации и выпадения осадков, хотя предполагалось, что выброс будет видимым, если атмосферные условия не будут характеризоваться высокой температурой и сухостью. Это также дает осторожную оценку, поскольку принимается максимальная концентрация в нисходящем потоке воздуха.

Количество вынесенной активности приведено в табл. 3.15. Оно рассчитано на основе данных для концентрации активности в воде (табл. 3.14) и полного количества выброшенной воды (табл. 3.13). Предполагалось, что разрыв произошел через 6 мес после взрыва, непосредственно после пуска установки, но и после удаления неконденсирующихся радиоактивных газов.

Сносимое ветром со скоростью 3 м/с цилиндрическое облако выброшенного пара расширяется в горизонтальном направлении со скоростями, предсказываемыми теорией подобия для атмосферной турбулентности. Были использованы значения турбулентной диссипации, которые согласуются с приведенными выше значениями скорости ветра и высоты центра облака над землей. Вертикальное расширение по сравнению с начальной высотой не учитывалось.

В табл. 3.16 представлены расчетные значения концентрации активности на уровне земли в зависимости от расстояния для разрыва

Таблица 3.16

Концентрация активности в воздухе с подветренной стороны в результате выброса
через 6 мес после 1000-килотонного ядерного взрыва

Расстояние с подветренной стороны, м	Относительная концентрация, м ⁻³	Ядерный взрыв					Термоядерный взрыв				
		концентрация активности, пКи/м ³					концентрация активности, пКи/м ³				
		³ H	¹²⁵ Sb	¹²⁷ MTe	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	³ H	¹²⁵ Sb	¹²⁷ MTe	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs
100	5,9(-7)	7,6(8) ¹⁾	2,1(6)	3,3(6)	4,7(4)	6,5(5)	7,1(8)	6,5(3)	9,4(3)	6,5(4)	1,9(3)
300	5,8(-7)	7,5(6)	2,0(6)	3,2(6)	4,6(4)	6,4(5)	7,0(8)	6,4(3)	9,3(3)	6,4(4)	1,9(3)
500	5,7(-7)	7,4(6)	2,0(6)	3,1(6)	4,8(4)	6,3(5)	6,9(2)	6,3(3)	9,1(3)	6,3(4)	1,9(3)
1000	4,5(-7)	5,9(6)	1,6(6)	2,5(6)	3,8(4)	5,0(5)	5,4(8)	5,0(3)	7,2(3)	5,0(4)	1,5(3)
3000	6,5(-8)	8,4(5)	2,3(5)	3,6(5)	5,2(3)	7,2(4)	7,8(7)	7,2(2)	1,0(3)	7,2(3)	2,1(2)
5000	1,5(-8)	2,0(5)	5,3(4)	8,2(4)	1,2(3)	1,7(4)	1,8(7)	1,7(2)	2,4(2)	1,7(3)	5,0(1)
10 000	2,0(-9)	2,6(4)	7,0(3)	1,1(4)	1,6(2)	2,2(3)	2,4(6)	2,2(1)	3,2(1)	2,2(2)	6,6(0)
МДК в воздухе, пКи/м ³		2(5)	2(4)	5(3)	1(3)	2(3)	2(5)	2(4)	5(3)	1(3)	2(3)

¹⁾ 7,7(6) = 7,7 · 10⁶ пКи/м³.

Таблица 3.17

Суммарная концентрация активности в воздухе с подветренной стороны в результате выброса [1]

Расстояние с подветренной стороны, м	Суммарная от- носительная кон- центрация, с/м ³	Суммарная концентрация, пКи · с/м ³									
		ядерное устройство					термоядерное устройство				
		³ H	¹²⁵ Sb	¹²⁷ MTe	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	³ H	¹²⁵ Sb	¹²⁷ MTe	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs
100	1,2(-5) ¹⁾	1,6(8)	4,2(7)	6,6(7)	9,6(5)	1,3(7)	1,4(10)	1,3(5)	1,9(5)	1,3(6)	4,0(4)
300	1,2(-5)	1,6(8)	4,2(7)	6,6(7)	9,6(5)	1,3(7)	1,4(10)	1,3(5)	1,9(5)	1,3(6)	4,0(4)
500	1,2(-5)	1,6(8)	4,2(7)	6,6(7)	9,6(5)	1,3(7)	1,4(10)	1,3(5)	1,9(5)	1,3(6)	4,0(4)
1000	1,0(-5)	1,3(8)	3,5(7)	5,5(7)	8,0(5)	1,1(7)	1,2(10)	1,1(5)	1,6(5)	1,1(6)	3,3(4)
3000	3,9(-6)	5,1(7)	1,4(7)	2,1(7)	3,1(5)	4,3(6)	4,7(9)	4,3(4)	6,2(4)	4,3(5)	1,3(4)
5000	1,9(-6)	2,5(7)	6,7(6)	1,0(7)	1,5(5)	2,1(6)	2,3(4)	3,0(4)	3,0(4)	2,1(5)	6,3(3)
10 000	6,8(-7)	8,8(6)	2,4(6)	3,7(6)	5,4(4)	7,5(5)	8,2(8)	7,5(3)	1,1(4)	7,5(4)	2,2(3)
Суммарная МДК, пКи · с/м ³		6(12)	6(11)	1,5(11)	3(10)	6(10)	6(12)	6(11)	1,5(11)	3(10)	6(10)

¹⁾ 1,2(-5) = 1,2 · 10⁵ с/м³.

457-миллиметровой трубы. В случае ядерного взрыва концентрации изотопов ^{127}MTe и ^{137}Cs на расстоянии 10 км лишь слегка перекрывают свои максимально допустимые концентрации (МДК). Изотоп ^3H , полученный в результате термоядерного взрыва, на порядок превышает свою МДК на том же расстоянии. Однако МДК относятся к облучению в течение года, тогда как облако проходит мимо любой конкретной точки за минуты. Это иллюстрируется табл. 3.17, в которой приведены суммарные концентрации активности за время прохождения облака. Эти концентрации сравниваются со значениями МДК, умноженными на число секунд в году. При этом даже в худшем случае облучение изотопом ^3H , образовавшимся в результате термоядерного взрыва, на расстоянии 100 м в подветренном направлении составляет лишь $\sim 0,25\%$ максимально допустимого.

Даже если пренебречь диффузией облака в атмосферу и ростом высоты султана пара (при этом сферическое облако, начальный объем которого определялся бы адиабатическим расширением выброшенного пара в атмосферу, сносилось ветром на уровне земли), то цифры, приведенные в табл. 3.16 и 3.17, были бы лишь на 1 – 2 порядка больше вблизи места утечки и приближались бы к указанным в этих таблицах значениям для расстояний 10 км и более. Хотя использованная здесь модель дает умеренные значения по сравнению с более строгими оценками, суммарное облучение на несколько порядков меньше годового облучения, на котором основаны таблицы МДК.

ПРОБЛЕМЫ, СВЯЗАННЫЕ СО СТРОИТЕЛЬСТВОМ СЕЙМОСТОЙКИХ СТАНЦИЙ

Прежде чем приступать к проектированию станций, строительство которых предшествует взрыву, необходимо произвести разумную оценку затрат, связанных с сооружением энергетической установки и ее оборудования, способных выдержать сотрясения от взрывов, произведенных после их постройки. Для этого необходимо знать реакцию почвы на глубокие подземные взрывы, которая в свою очередь зависит от мощности заряда, глубины его размещения и физических свойств пород площадки.

С точки зрения сооружения сейсмостойких станций (усиление конструкции или изоляция ее от сотрясения) наиболее важная особенность ожидаемого движения почвы – это отслоение верхнего пласта земли и отделение его от нижнего пласта в результате взаимодействия удар-

ной волны, вызванной ядерным взрывом, со свободной поверхностью земли. Когда разрушенная масса породы в трубообразной полости свободно падает обратно и сталкивается с нижним пластом (основанием полости), возникает так называемый "хлопок" (slap-down), в результате которого происходят сильные вторичные движения почвы.

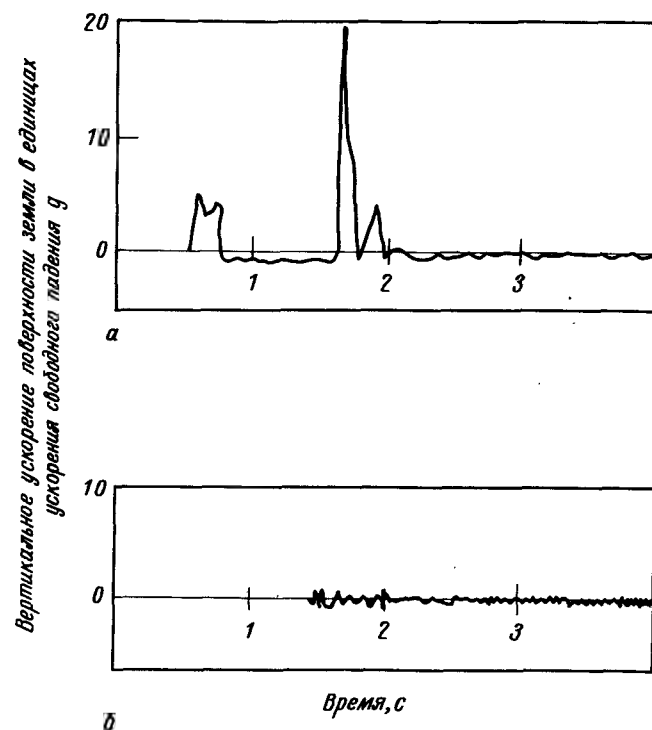
Наблюдаемое сейсмическое возмущение в зоне "хлопка" характеризуется приходом сначала ударного импульса (волны сжатия), а затем резкого импульса схлопывания, который может быть гораздо сильнее первого. За пределами зоны обрушения сейсмическое возмущение создается множеством колебаний с сильно уменьшенной амплитудой и явным отсутствием импульса схлопывания. В этом отдаленном районе, отстоящем на расстоянии более 24 км, становятся более важными сдвиговые, отраженные и поверхностные волны, и, таким образом, регистрируемые движения земли подобны возмущению, вызванному землетрясением.

Между зоной резкого хлопка и удаленной зоной существует переходная зона, куда первым приходит импульс с максимальной амплитудой.

Кривая на фиг. 3.22,а может быть типичной для наблюдения на расстоянии 300 – 600 м от эпицентра. Ясно виден начальный ударный импульс, а также два импульса схлопывания, которые приходят примерно через 1 с после первого импульса. Кривая на фиг. 3.22,б отражает возрастание времени прихода возмущения к воображаемому датчику, расположенному в нескольких километрах от эпицентра. Отмечается отсутствие "хлопка" и затухание амплитуды колебания.

Из-за невозможности воспроизвести условия распространения сейсмических возмущений для каждой геотермальной площадки для расчетов начального смещения почвы было предложено ввести поправочный коэффициент, равный трем. На фиг. 3.23 приведен график расчетной амплитуды ускорения для трех зарядов, который показывает влияние расстояния от эпицентра на интенсивность движения почвы. Легко видеть, что на значительном расстоянии от эпицентра ожидаемая амплитуда ускорения поверхности земли будет сравнима с амплитудой в сейсмической зоне обычного землетрясения. Видно, однако, что для меньших расстояний предсказанное ускорение движения поверхности земли резко возрастает.

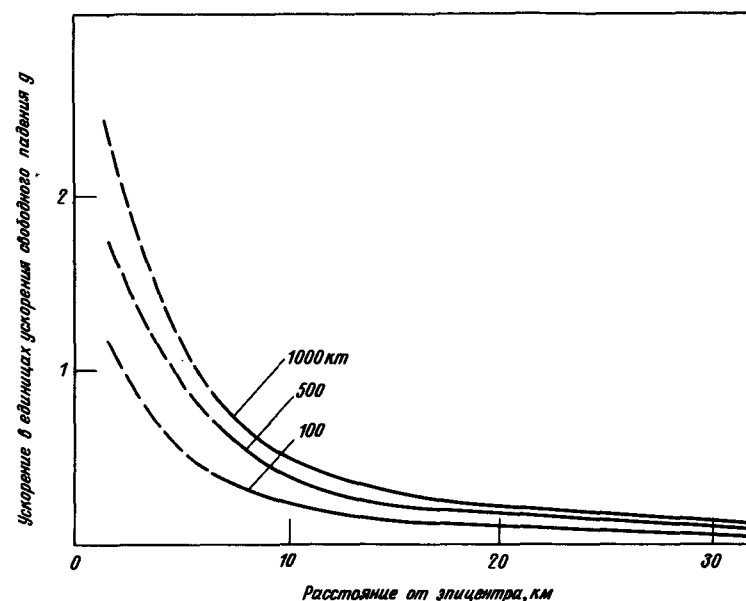
Кривые представляют собой средние значения, полученные из многих наблюдений в натурных условиях. Однако эти наблюдения не проводились ближе границы зоны "хлопка". Таким образом, получен-



Ф и г. 3.22. Сравнение характерных записей колебаний поверхности земли
а — в зоне "хлопка"; б — за пределами зоны "хлопка".

ные данные не должны использоваться для предсказания движений поверхности земли на более близких к эпицентру расстояниях. Для очень близких расстояний, где ускорения превышают ускорение силы тяжести и "хлопок" играет важную роль, имеется еще меньше наблюдений, на которых могли бы основываться надежные предсказания колебаний земли. Опубликованные данные весьма ограничены. В нескольких работах исследовались способы улучшения существующих методов или предлагались новые методы определения колебаний поверхности земли в областях, прилежащих к эпицентру, однако гораздо больше еще предстоит сделать в этом направлении.

В настоящее время имеются лишь крайне скудные данные, на основании которых можно предсказать колебания в зоне обрушения, и ни один из них не относится к тем сочетаниям мощностей зарядов и



Ф и г. 3.23. Расчетная амплитуда ускорения поверхности земли [1].
Глубина размещения зарядов 2,6 км.

глубин их размещения, которые предполагается использовать в Плоушерском проекте, хотя в отдельности проводились измерения для больших зарядов и больших глубин.

Следует подчеркнуть, что имеющиеся в настоящее время предсказания движения поверхности земли относятся только к результирующим максимальным векторам ускорения, скорости и смещения. Ортогональные компоненты, одна вертикальная и две горизонтальные, не определялись, за исключением общих исследований записей колебаний поверхности земли. Согласно этим исследованиям, вблизи эпицентра обычно существуют очень небольшие горизонтальные компоненты, и смещение почти полностью вертикально. На больших расстояниях, вдали от зоны "хлопка", преобладают горизонтальные компоненты. Вблизи границы "хлопка" все три компоненты могут быть почти одинаковыми. Кроме того, существующие методы не дают возможности определить влияние на движение поверхности взаимодействия зон разрушений от нескольких взрывов.

Если при монтаже электростанции на плаву она будет расположена в конце 13-километрового канала, то при взрыве 1000-килотонного устройства она испытает точно такое же сейсмическое воздействие, какое ожидалось бы в третьей сейсмической зоне землетрясения. Для меньших зарядов требуется соответственно более короткий канал. Таким образом, когда баржа расположена на дальнем конце канала, где колебания поверхности значительно ослаблены, возмущения пройдут без последствий. По окончании серии взрывов баржа буксируется назад по каналу и снова соединяется с основным выводным трубопроводом.

Основные особенности эксплуатации плавучей энергетической установки заключаются в следующем: сооружение баржи с установленным на ее палубе агрегатом, состоящим из турбины, генератора и конденсатора, производится одновременно с рытьем канала, нивелированием, утрамбовкой грунта и установкой в канале непроницаемой облицовки. Построенная баржа будет находиться в безопасном конце канала, ожидая первой серии взрывов. Возможно, окажется выгодным построить временную плотину непосредственно перед плавучим комплексом, чтобы предотвратить потерю воды в случае, если часть канала или бассейна для охлаждения, расположенного вблизи эпицентра, будут разрушены в результате взрыва. После необходимого ремонта канала и выводного трубопровода баржу буксируют к бассейну для охлаждения, размещают внутри водоема, окруженного бетонной стеной, и соединяют с трубопроводами.

Ожидается, что после каждой серии взрывов тепло можно будет использовать в течение ~ 10 лет. Поэтому на девятом году установку останавливают и буксируют на дальний конец канала в ожидании второй серии взрывов. Затем баржу возвращают обратно к бассейну для охлаждения и присоединяют к первоначальным трубопроводам, чтобы использовать оставшуюся энергию. На десятом году баржу перемещают и присоединяют ко второму источнику тепла, рассчитанному на десятилетнее пользование. Та же процедура повторяется для третьей и последней серий взрывов. При определенных условиях стоимость энергии, вырабатываемой такой установкой, могла бы составить 0,5 – 0,7 цент/(кВт · ч).

Согласно Стюарту [10], эти цифры могут по некоторым причинам оказаться завышенными. С учетом истощения естественных ресурсов и характера местности, позволившего использовать проект подвижной установки, стоимость могла бы сократиться на 0,04 – 0,08 цент/(кВт · ч)

соответственно. По окончании исследования было объявлено, что скважины большого диаметра (610 мм) для размещения мощных зарядов могут быть гораздо меньшими ($\sim 203 - 229$ мм). Это также уменьшило бы стоимость разработки поля и стоимость энергии на $\sim 0,125$ цент/(кВт · ч).

Ключевой проблемой является отыскание геотермального участка в таком районе, где можно было бы взрывать большие ядерные устройства (более 200 кт), где имеются в достаточном количестве подземные или поверхностные воды для обеспечения работы конденсатора энергетической установки и где можно найти рынок сбыта электрической энергии. Возможно противодействие общественности осуществлению таких проектов, однако относительная чистота получения геотермальной энергии поможет преодолеть любую оппозицию.

Патент Диксона [11]

Диксон предлагает использовать подземный ядерный взрыв в зоне, расположенной над горячими вулканическими породами. Зона взрыва выбирается достаточно глубоко под поверхность, чтобы избежать радиоактивного выброса, и достаточно высоко на вулканических породах, чтобы окружающая температура не оказывала влияния на ядерное устройство. Ядерный взрыв должен образовать трубообразную полость, достигающую зоны вулканических пород с температурой выше 200°C .

Затем в полость закачивается вода, которая при соприкосновении с вулканическими породами превращается в пар. Пар выводится и используется в качестве источника энергии. Если пар, образовавшийся в первое время после ядерного взрыва, обладает избыточной радиоактивностью, его можно собрать на поверхности и сбросить в безопасное место. Когда пар будет иметь допустимый уровень радиоактивности, его можно будет использовать по назначению.

Плоушерская программа стимулирования естественных геотермальных ресурсов [12]

Существует большая разница между данным исследованием стимулирования и исследованием технической осуществимости Плоушерской геотермальной программы. В случае сухого геотермального месторождения требуются большие ядерные устройства (более 200 кт) и подземные воды не используются. В случае стимулирования естест-

венных систем требуются малые заряды (1 – 5 кт) и используются естественные подземные воды. Ожидается, что стимулированием естественных геотермальных систем с помощью ядерных взрывов можно обеспечить следующие преимущества по сравнению с естественными геотермальными системами.

1. Эффект увеличения диаметра скважины. Этот эффект аналогичен наблюдавшемуся в экспериментах по стимулированию месторождений природного газа. Ядерный взрыв может сделать неэкономичную скважину экономически эффективной благодаря увеличению расхода и общего выхода пара из раздробленных больших масс породы.

2. Свободный объем для превращения воды в пар. Несколько продуктивных скважин было заброшено, когда после 12 – 18 мес работы поток пара был отсечен отложениями минеральных солей, выделяющимися из воды при ее испарении в стволе скважины. Полученный свободный объем может быть достаточным для испарения и обеспечить продуктивность скважины на протяжении 10 – 20 лет. Можно также получать сухой пар из скважины, производившей ранее влажный пар.

3. Дробление породы приводит к образованию незаполненной полости, в которую можно закачивать конденсат и соли, полученные из скважины. Во многих районах (например, Солтон-Си) нужно будет возвращать все жидкости в формацию, из которой они были извлечены, так как они имеют слишком высокую концентрацию минеральных солей, чтобы их можно было сбрасывать на поверхности. Постоянное пополнение подземных вод могло бы стать дополнительным преимуществом в тех районах, где их приток ограничен.

Основные проблемы, связанные с Плоушерским проектом стимулирования, которые требуют обсуждения, заключаются в следующем: 1) какова "судьба" радиоактивности в геотермальных водах и может ли эта радиоактивность представлять какую-либо опасность; 2) не нарушит ли ядерный взрыв естественную систему путем сдвига по основному разлому или каким-либо другим образом.

Необходимо отметить, что в нескольких случаях уже предпринимались успешные попытки стимулировать естественные геотермальные системы с помощью гидравлических разрывов. Это дает основания ожидать, что ядерное стимулирование с помощью ядерного взрыва окажется еще более успешным. Следует отметить, что проницаемость пород геотермальных полей Долины Больших Гейзеров и Лардерелло является вторичной проницаемостью, т.е. проницаемостью, обусловленной разломами. Ядерные взрывы, вероятно, создадут связь между

разломами и таким образом увеличат проницаемость, являющуюся ключевым фактором для промышленного использования.

Были проведены обсуждения со следующими специалистами в области геотермальных систем, с тем чтобы они высказали свое мнение о желательности осуществления Плоушерской программы стимулирования естественных ресурсов и о том, может ли это представить интерес для них применительно к системам, которыми они занимаются.

Исландия

Д-р Г. Палмасон – Отделение природного тепла

Г-н Дж. Зоega – Служба отопления Рейкьявического муниципального района

Г-н К. Рагна – Отделение природного тепла

Италия

Д-р П. Арон – фирма ENEL, Рим

Д-р П. Кательди – фирма ENEL, Рим

Г-н Ж.К. Ферра – Лардерелло

Г-н П.Д. Бургасси – Лардерелло

Д-р М. Фарелли – геолог, Пиза

Турция

Кей-Хан Гурани – инженер

Новая Зеландия

Г-н Дж.Х. Смит – Министерство строительных работ, Веллингтон

Г-н В.Б. Стилвелл – инженер-конструктор, Уайракей

Г-н Дж. Жиардин – управляющий предприятием, Уайракей

Япония

Д-р Х. Накамура – Геологическое управление Японии

Д-р К. Сато – Рудная компания Давы

Проф. Х. Ига – Японская ассоциация геотермальной энергии

Г-н Йошими Хара – главный инженер, геотермальная установка в Отаке

Гавайские острова

Д-р В. Арнелл – Центр инженерных исследований

Д-р Джон В. Шюпе – Инженерная школа, Гавайский университет

Д-р Р. Фэнд – руководитель отделения инженеров-механиков, Гавайский университет

Большие Гейзеры, шт. Калифорния

Д-р К. Отте – фирма "Юнион ойл"

Г-н Т. Честэйн – "Большие Гейзеры"

Г-н А. Брюс – фирма "Пасифик гэз энд электрик".

Так как высказанные соображения сходны, их можно подытожить следующим образом:

1. Все специалисты выразили беспокойство относительно возникающей радиоактивности, уровень которой зависит от типа и размера ядерного устройства и от характера естественной системы. Если предположить, что эта задача будет успешно решена, то все полагают, что стимулирование могло бы способствовать экономичной добыче геотермального пара.

2. Никто не выразил беспокойства по поводу нарушения естественной системы. Все полагают, что дополнительное трещинообразование и образование свободных объемов при взрыве, по-видимому, увеличат расходы добываемых воды и пара.

3. Все рано или поздно затронули вопрос о закачке извлеченной из месторождения воды, так как оказывается, что ограничением на использование природных систем является приток воды, а не запас тепла. В ограниченных пределах закачку пытались применять в Долине Больших Гейзеров в Калифорнии, и при этом не было замечено снижения производительности соседних скважин. Часть опрошенных считают, что небольшая полость могла бы оказаться полезной при закачке.

4. Почти все считают, что информация, содержащаяся в данном исследовании и в экспериментальной программе, представила бы интерес для их собственных планов геотермальных разработок.

5. Один из опрошенных предложил провести эксперимент по стимулированию на своем геотермальном участке. Несколько человек предложили опробовать Плушерскую методику после завершения ее разработки.

Литература

1. A Feasibility Study of a Plowshare Geothermal Power Plant, PNE-1550, 1971.
2. Gilluly J., The Tectonic Evolution of the Western United States, *Geol. Soc. London Quart. Jour.*, **19**, 133 – 174 (1963).
3. Jaeger J.C., The Temperature in the Neighborhood of a Cooling Intrusive Sheet, *Amer. Jour. Sci.*, **255**, 306 – 318 (1957).
4. Gilluly J., The Ajo Mining District, Arizona, U.S. Geol. Survey Prof. Paper 209, p. 112, 1964.

5. Holzer F., Arguments for Using Two or More Explosives per Emplacement Hole for WASP UOPK 69 – 25, Sept., 1969 (письмо, адресованное G.C. Werth).
6. BNW, Engineering Economics Analysis of U.S. Patent 3,465,818 as it Applies to a Geothermal Plant, March, 1970.
7. Heitmann H., *Glastechn.*, **38**, p. 41 (1965).
8. Proceedings of the United Nations Conference on New Sources of Energy, 1961.
9. Kruskopf K.B., Introduction to Geochemistry, McGraw-Hill Book Co., New York, 1967, p. 461.
10. Stewart D.H., The Status of Plowshare Geothermal Power, BNWL-SA-4079, Battelle, Pacific Northwest Laboratories, Oct. 1971.
11. Dixon R.P., U.S. Patent 3,640,336; Feb. 1972.
12. Stewart D.H., Burnham J.B., Survey of Expert Geological Opinion on Feasibility of Plowshare Stimulation of Natural Geothermal Systems, BNWL-B-134, Battelle, Pacific Northwest Laboratories, Sept. 1971.

ТРИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Образование накипи при моделировании геотермального раствора

При написании данной главы использованы материалы работы Харли [1], в которой описывается экспериментальное исследование образования накипи из искусственно приготовленного геотермального раствора и влияние этой накипи на характеристики теплопередачи.

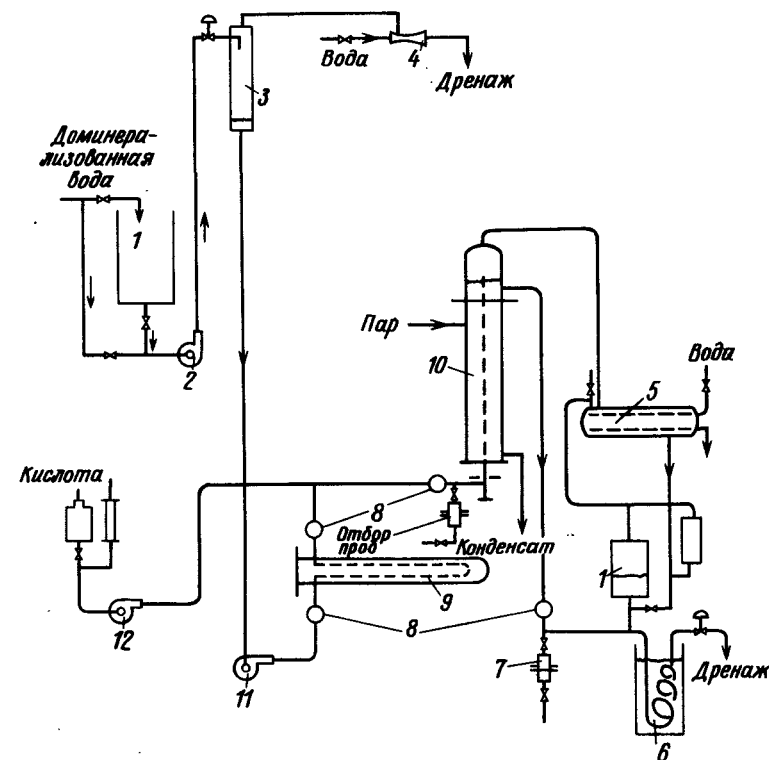
Ведомством по опреснению вод Министерства внутренних дел США подготовлен проект опытно-промышленной установки для исследования процесса производства пресной воды путем испарения геотермального раствора с помощью вертикально-трубного испарителя (ВТИ) с восходящим потоком. В качестве вклада в эту работу Окриджская национальная лаборатория должна была обеспечить предварительную информацию о способности кремнезема, растворенного в растворе, откладываться на нагретых поверхностях труб испарителя.

Поскольку Окриджская национальная лаборатория только что закончила исследование характеристик теплопередачи однострунного испарителя с восходящим потоком с использованием растворов, не образующих накипи в представляющем интерес интервале температур $120 - 200^\circ\text{C}$, то имелась в наличии установка, которую можно было легко приспособить для проведения испытаний по изучению тенденции к образованию накипи содержащих силикаты растворов.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Созданный ранее для исследования характеристик теплопередачи при использовании искусственно приготовленных растворов высокотемпературный вертикальный однострунный испаритель был переделан из замкнутой системы в разомкнутую для проведения испытаний по изучению образования накипи. Модификация установки состояла в добавлении трех емкостей для смешения и подачи питательной солевой воды, деаэратора для удаления кислорода из этой воды, системы

добавления кислоты для превращения силиката натрия в питательной воде в кремневую кислоту после нагревания воды до рабочей температуры и системы сброса для охлаждения и слива раствора после его прохождения через испаритель. За нагревателем воды на входе в испаритель и в сливном трубопроводе за испарителем были размещены освещаемые смотровые окна, с тем чтобы во время работы установки можно было проводить визуальные наблюдения за выпадением осадков. Схема установки приведена на фиг. 4.1.



Фиг. 4.1. Схема установки для исследования образования накипи при использовании геотермального раствора [1].

1 — емкость с соленой водой; 2 — насос; 3 — деаэратор; 4 — эжектор; 5 — конденсатор; 6 — холодильник системы сброса; 7 — фильтр на линии отбора проб; 8 — смотровые окна; 9 — нагреватель раствора; 10 — испаритель; 11 — насос для перекачивания солевой воды; 12 — насос для перекачивания кислоты.

Искусственный раствор приготавливался в трех изготовленных из нержавеющей стали емкостях объемом ~1140 л каждая. Питательный раствор или деминерализованная вода могут быть перекачаны в вакуумный деаэратор через питающий трубопровод диаметром 95 мм, изготовленный из пластмассы; на этой линии установлен регулирующий клапан, поддерживающий требуемый уровень в данной части деаэратора. Деаэратор представляет собой стеклянную трубу длиной 2,5 м и диаметром 100 мм с керамическими уплотнителями размером 25 мм. С помощью водоструйного эжектора фирмы "Шютте и Кертинг" в деаэраторе поддерживается разрежение ~98,2 кПа (736 мм рт. ст.).

Жидкость из деаэратора подается самотеком к перекачивающему питательный раствор насосу, расположенному на 11,6 м ниже деаэратора. Это позволяет поддерживать высоту всасывания перекачивающего насоса на уровне ~1,5 м вод. ст. Расход жидкости регулируется путем изменения числа оборотов привода насоса и поддерживается на уровне ~1,9 л/мин.

Холодный раствор прокачивается через измерительную диафрагму, нагревается до требуемой температуры при прохождении через обогреваемый паром нагреватель и подается снизу в испаритель через регулируемую диафрагму, с помощью которой регулируется интенсивность вскипания на входе. Труба испарителя с двойным гофрированием наружным диаметром 25,4 мм изготовлена из медноникелевого сплава (90% Cu, 10% Ni). Она обогревается с наружной стороны за счет конденсации технического пара, который подается в изготовленную из нержавеющей стали рубашку диаметром ~150 мм, охватывающую трубу испарителя. Затем жидкость выходит из верхней части испарителя и самотеком поступает к регулирующему уровню баку, а затем в систему сброса.

Образующийся в процессе испарения в трубе испарителя пар поступает через сепаратор с изготовленной из нержавеющей стали проволочной ловушкой в конденсатор. Конденсат проходит через регулирующий уровень бак и затем попадает в систему сброса, где он смешивается со сливаемым из установки раствором.

При проведении опытов с кремнеземом в соленую воду закачивается соляная кислота (22 вес. %) в точке трубопровода расположенной между нагревателем воды и входом в испаритель. Кислота подается в достаточном количестве для превращения силиката и карбоната натрия, содержащихся в питательной воде, в кремневую кислоту и в хлорид натрия. Образующийся при этом углекислый газ удержива-

ется в растворе за счет избыточного давления до момента вскипания жидкости в испарителе, когда CO_2 выделяется из раствора и выпускается из конденсатора.

В тех испытаниях, в которых в питательном растворе содержались соли кальция и магния, они добавлялись в виде хлоридов к кислоте, с тем чтобы предотвратить отложение накипи в нагревателе.

Система сброса представляет собой охлаждаемый водой трубчатый змеевик емкостью 114 л из нержавеющей стали 316 длиной ~9 м и наружным диаметром 95 мм. Раствор охлаждается технической водой до температуры ниже 37° и затем сбрасывается через регулирующий уровень клапан в большой бак-сборник или непосредственно в дренаж.

Смотровые окна, изготовленные из пирекса, диаметром 25 мм и толщиной 12,7 мм, расположены в трубопроводах на входе и выходе из нагревателя, а также на входе в испаритель и на сливной линии из него и используются для наблюдения за образованием осадков в системе.

Трубопроводы для отбора проб и электрически обогреваемые бомбы для образцов расположены на входе и выходе из испарителя. В бомбах для образцов находится сетка с фильтровальной бумагой с размером пор 5 – 10 мкм для сбора твердых частиц при рабочей температуре.

ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ УСТАНОВКИ

Для всех переделок первоначальной экспериментальной установки были использованы материалы, находящиеся под рукой или имеющиеся на местных складах. Работа всех элементов системы в начале испытаний с использованием воды оказалась удовлетворительной, за исключением деаэратора.

Первоначально деаэратор был изготовлен из стеклянной трубы длиной 2,5 м и диаметром 50 мм с керамическими уплотнителями размером 25 мм. При этом отношение диаметров трубы и уплотнителя очевидно оказалось слишком малым, поскольку полученная минимальная концентрация кислорода составляла только 200 мкг/л. Нагревание питательного раствора от 37 до 43°C с целью уменьшения парциального давления кислорода не улучшило характеристик неизолированного деаэратора и поэтому первоначальный блок был заменен колонной диаметром ~100 мм той же высоты, с тем же размером уплот-

нения. После замены концентрация кислорода в питательной воде уменьшилась до ~ 50 мкг/л, что можно было считать вполне удовлетворительным. В последующих экспериментах с соленой водой концентрация кислорода составляла 20 мкг/л. Единственной серьезной проблемой, с которой пришлось столкнуться в ходе экспериментов, оказалась подача кислоты.

Хотя и ожидалась коррозия изготовленного из нержавеющей стали трубопровода под действием соляной кислоты, не предполагалось, что она будет столь быстрой, что помешает проведению испытаний. Поэтому система подачи кислоты, включающая трубопровод и питающий бак, была изготовлена из нержавеющей стали марки 316. Насос для перекачки кислоты с пульсирующим микропитателем "Лэп" был оборудован головкой из нержавеющей стали марки 20 фирмы "Карпентер" и обратным клапаном, выполненным из сплава на никелевой основе хастеллой С.

Во время первых испытаний с использованием HCl, образующегося в результате коррозии во всасывающем трубопроводе насоса, газа было достаточно для заполнения этим газом малого объема насоса. Чтобы свести к минимуму выделение газов стальной расходный бак был заменен стеклянным баллоном, а стальной всасывающий трубопровод — полиэтиленовым. Кроме того, потребовалось, там где это возможно, облицевать головку насоса специальным эпоксидным покрытием. Даже в этом случае удовлетворительная перекачка кислоты поддерживалась только в течение нескольких часов до тех пор, пока расход не начинал падать вследствие выделения газа в малых каналах между обратными клапанами насоса и основной полостью диафрагменного насоса. Производительность насоса удалось повысить периодической промывкой водой в течение 10 — 20 мин.

Во время работы с подогревом коррозия на линии ввода кислоты в основной контур была причиной остановок установки в двух случаях. В первом случае коррозия имела место в изготовленном из нержавеющей стали трубопроводе для подачи кислоты, а во втором случае — в заменяющем его трубопроводе из титана. В конце концов на этом участке с успехом был использован трубопровод из тантала диаметром 12,7 мм.

ПРОГРАММА ИСПЫТАНИЙ

Состав моделируемого раствора, используемого в этих испытаниях, был таким же, как и в опытах фирмы "Энвиродженикс", проводимых в Райтсвилл-Бич, шт. Северная Каролина. Состав раствора

приведен ниже (в г/л):

NaCl	13,7
KCl	1,84
LiCl	0,0893
NaBr	0,0937
H ₃ BO ₃	0,0562
Na ₂ CO ₃	1,126
Na ₂ SO ₄	0,014
Na ₂ SiO ₂ · 9H ₂ O	3,786
CaCl ₂	0,590
MgCl ₂ · 6H ₂ O	0,105
HCl	чтобы получить pH = 7

Чтобы качественно определить состав отложений накипи, эксперименты были разделены на три фазы: 1) опыты при наличии кальция и магния, но при отсутствии силиката; 2) опыты при наличии силиката в питательном растворе, но при отсутствии кальция и магния; 3) опыты при наличии в питательном растворе всех компонентов.

Фаза 1. В этой серии опытов в соленую воду добавлялась в стехиометрическом количестве соляная кислота, с тем чтобы перевести карбонат в хлорид и воду с выделением двуокиси углерода. В опытах при температуре 132 °C на участке до испарителя не наблюдалось выпадения осадка, в то время как при температуре 154 °C образовывались незначительные осадки, а при температуре 182 °C наблюдались достаточно плотные отложения. Во время последней серии опытов коррозия, имевшая место в трубопроводе на линии подачи кислоты в основной контур, возможно, приводила к уменьшению общего количества кислоты, взаимодействующей с карбонатом, и как следствие этого, к наблюдаемому выпадению осадка, которым был, вероятно, CaCO₃.

Фаза 2. В первых опытах с образованием кремнезема работа была затруднена из-за утечек кислоты и довольно плохого перемешивания питательной воды. Эти недостатки удалось преодолеть установкой танталового трубопровода на линии подачи кислоты, а также применением специальной мешалки для улучшения перемешивания химических продуктов. (Ранее перемешивание обеспечивалось циркуляцией.)

Визуальные наблюдения, проведенные в ходе опытов при температурах соленой воды на входе соответственно 182 и 154 °C, показали наличие прозрачного раствора на входе в испаритель. На выходе из испарителя после вскипания соленой воды с соответствующим по-

нижением температуры на 5 и 11°C и выделения CO_2 через смотровые окна наблюдалось помутнение раствора. Затем, после смешения сбрасываемой соленой воды с поступающим из конденсатора конденсатом и охлаждением смеси в системе сброса, пробы оказывались обычно совершенно прозрачными, что указывало на то, что либо присутствовавшие в жидкости на выходе из испарителя осадки выпадали в холодильнике системы сброса, либо они снова растворялись в сбрасываемой жидкости.

Наиболее продолжительный эксперимент, длившийся 13 ч при температуре соленой воды на выходе, равной 143°C, был прекращен вследствие ограничения расхода через холодильник системы сброса, когда избыточного давления в 300 кПа оказалось недостаточно для обеспечения расхода на данном участке трубопровода, равного 1,9 л/мин. Это сопровождалось ростом температуры в системе сброса до ~60°C.

При работе с нормальным потоком в системе сброса при $\text{pH} = 7$ отделение конденсата пара (требуемое для измерения массовой скорости конденсации) приводило к увеличению значения pH до ~8 – 8,5. Это означает, что конденсат сам по себе является кислым, что вероятно, обусловлено растворенным в нем CO_2 .

Фаза 3. В этой фазе проводился один эксперимент продолжительностью около двух часов. В течение этого периода времени происходило быстрое выпадение осадков, содержащих Mg и Ca. Опыт проводился при температуре раствора на входе 182°C, чтобы исключить неустойчивый характер течения пара по направлению к нагревателю при пониженных давлениях пара.

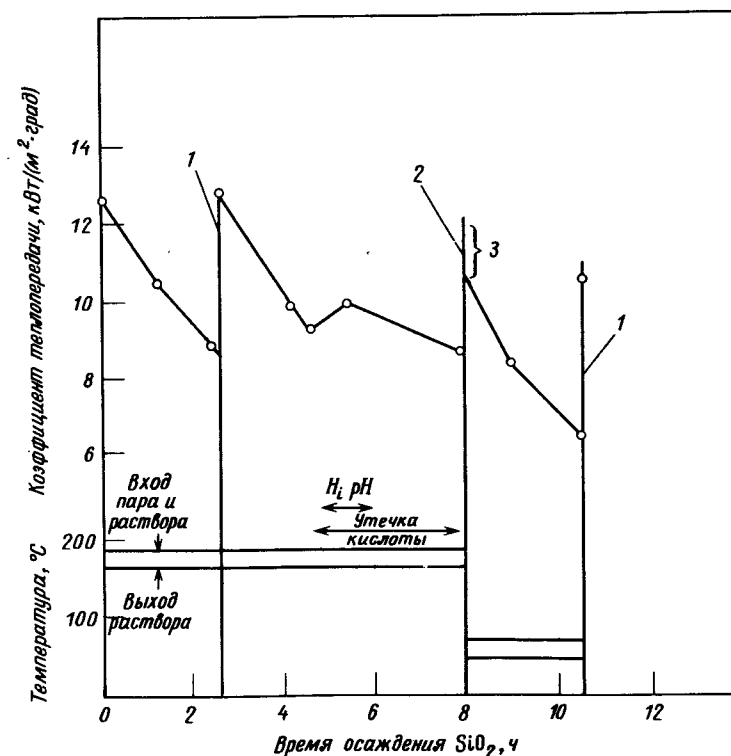
Когда началась подача кислоты в соленую воду, то на входе в испаритель наблюдалось значительное отложение осадков, но затем по достижении потоком смеси кислота – раствор нормальной концентрации раствор становился прозрачным.

При уменьшении производительности кислотного насоса, вызванном накоплением газа в рабочей камере насоса, в смотровом окне на входе в испаритель снова наблюдалось появление твердого осадка. При восстановлении первоначальной производительности насоса выпадение осадка на входе прекращалось. Во время эксперимента в поле зрения смотрового окна на выходе из испарителя скапливалось так много отложений, что они препятствовали прохождению света, а пробы, взятые из системы сброса, содержали черный хлопьевидный оса-

док, который, по-видимому, состоял в основном из гидроокиси магния. Этот эксперимент был прекращен из-за сложностей, связанных с перекачкой кислоты, и не был продолжен, поскольку уже было продемонстрировано образование накипи.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ

С целью получения опорных данных были проведены измерения коэффициентов теплопередачи в ходе предварительных экспериментов на воде. Кроме того, во время испытаний в фазе 1, когда



Фиг. 4.2. Влияние отложений SiO_2 на теплопередачу при $\Delta T = 11^\circ\text{C}$ [1]. Расход раствора 1,9 л/мин; концентрация SiO_2 800 мг/л; $\text{pH} = 7 - 7,5$. 1 — вода в ночное время, 149°C; 2 — отключение установки в ночное время; 3 — отключение установки в горячем состоянии.

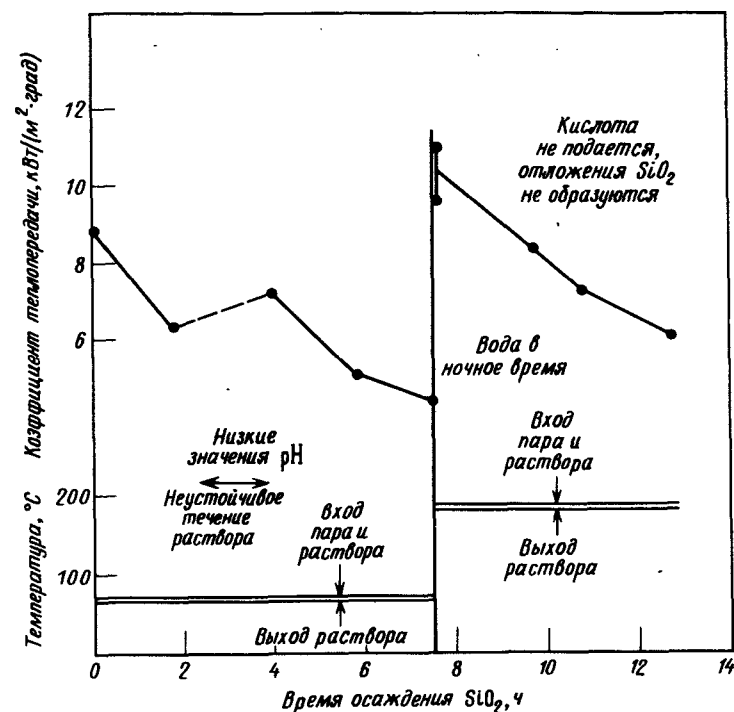
исследовалось выпадение осадков из присадок CaCl_2 и MgCl_2 при трех различных рабочих температурах, были проведены дополнительные измерения коэффициентов теплопередачи с целью установления факта, что трубопровод не заполнен образовавшимися осадками.

Основное внимание было сосредоточено на фазе 2, во время которой опыты проводились при наличии кремнезема в растворе, но при отсутствии кальция и магния. Хотя в предыдущих опытах встретились значительные трудности, связанные с работой системы подачи кислоты, результаты, полученные в данных опытах, были аналогичны результатам, полученным в более поздних опытах.

На фиг. 4.2 — 4.4 приведены графики изменения суммарных коэффициентов теплопередачи в зависимости от времени образования осадка из кремнезема (времени перекачивания кислоты). На фиг. 4.2 представлены результаты, полученные при $\Delta T = 11^\circ\text{C}$ при температурах пара и раствора на входе 182 и 154°C . Хорошо видно, что характеристики теплопередачи восстанавливались во время ночной работы на деминерализованной воде или после остановки и повторного пуска на воде, на что требовалось около четырех часов. В одном случае имел место постоянный спад характеристик, когда потребовалось отключить установку в горячем состоянии.

Эксперименты при $\Delta T = 3^\circ\text{C}$ были проведены для определения влияния ΔT на образование накипи. Результаты приведены на фиг. 4.3. Хотя скорость образования накипи была меньшей, чем в случае $\Delta T = 11^\circ\text{C}$, она все же оставалась довольно высокой. Во время экспериментов при $\Delta T = 3^\circ\text{C}$ наблюдалась меньшая точность измерений и большие колебания данных в уравнении теплового баланса. Это обусловлено меньшими скоростями накопления пара и конденсата в измерительных емкостях, из-за чего возникал больший дрейф температур системы, чем в испытаниях при более высоких значениях ΔT . Кроме того, после образования накипи измеренная скорость конденсации становилась соизмеримой по величине с тепловыми потерями в системе, что приводило к дополнительной потере точности измерений.

Большинство испытаний по исследованию образования накипи включало периоды непрерывной работы установки, не превышающие 8 ч. Был проведен один более продолжительный опыт с целью получения качественного образца накипи для анализа и для выяснения, устанавливается ли равновесный процесс образования накипи. Планировался опыт продолжительностью 16 ч. Однако образовавшиеся отложения вызвали резкое ограничение расхода в холодильнике системы

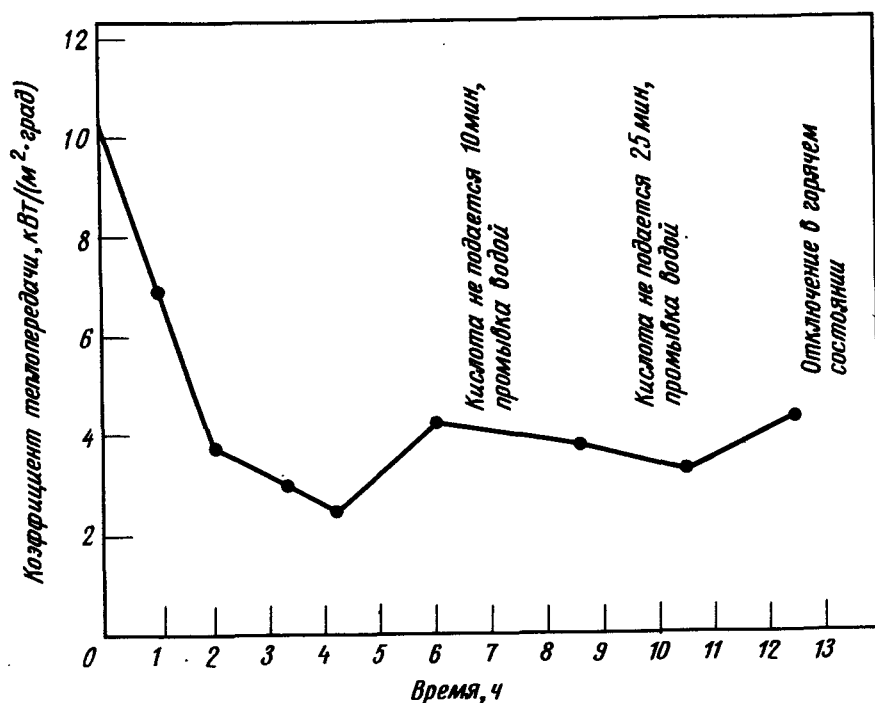


Фиг. 4.3. Влияние отложений SiO_2 на теплопередачу при $\Delta T = 3^\circ\text{C}$ [1]. Расход раствора 1,9 л/мин; концентрация SiO_2 800 мг/л; $\text{pH} = 7 - 7,5$.

сброса спустя 13 ч после начала опыта, что заставило прекратить опыт. На фиг. 4.4 приведены результаты измерения теплопередачи в этом эксперименте, который проводился при температуре соленой воды на входе 154°C и при падении температуры в процессе вскипания на $\Delta T = 11^\circ\text{C}$. Установка при этом была отключена без промывки, опорожнена и затем охлаждена в атмосфере инертного газа.

Сливной трубопровод испарителя был открыт для получения образца накипи. Визуальный осмотр показал, что отложения накипи были равномерно распределены по внутренней поверхности трубы, а не концентрировались на дне канавок между гофрами.

После извлечения образца накипи рабочий контур был снова замкнут и пущен на воде. После полутора часов работы, потребовавшихся



Фиг. 4.4. Теплопередача моделируемого геотермального раствора [1].
 Температурв пара на входе 154°C ; температурв раствора на входе 154°C ;
 температура раствора на выходе 143°C ; расход раствора $113,5 \text{ кг/ч}$; раствор
 не содержит ни Ca, ни Mg.

для нагревания воды до рабочей температуры 154°C на входе и 143°C на выходе, суммарный коэффициент теплопередачи восстановился до значения $5,15 \text{ кВт/(м}^2 \cdot \text{град)}$ по сравнению с эквивалентным значением коэффициента теплопередачи, равным $\sim 2,84 \text{ кВт/(м}^2 \cdot \text{град)}$ во время отключения установки. В течение следующих 5 ч работы коэффициент теплопередачи изменялся в пределах от $5,41$ до $5,61 \text{ кВт/(м}^2 \cdot \text{град)}$. После работы в течение ночи на воде коэффициент теплопередачи увеличился до $6,91 \text{ кВт/(м}^2 \cdot \text{град)}$, что сравнимо с его значениями $7,38 - 7,72 \text{ кВт/(м}^2 \cdot \text{град)}$, полученными во время предварительных опытов на воде. Кремнезем, очевидно, также оказался растворенным на выходе из системы сброса, поскольку не наблюдалось никаких трудностей с поддержанием уровня.

В фазе 3 был проведен один короткий опыт при температуре пара на входе 182°C и $\Delta T = 11^{\circ}$ для соленой воды при вскипании. Планировалось провести этот опыт при температуре пара на входе 154°C , но из-за потери устойчивости потока пара на входе в нагреватель раствора после проведения опыта без подачи кислоты в систему пришлось провести данный эксперимент при температуре на входе 177°C для достижения лучшей регулируемости потока пара. В опыте без подачи кислоты в систему получено значение коэффициента теплопередачи, равное $11,9 \text{ кВт/(м}^2 \cdot \text{град)}$. После полутора часов работы с подачей кислоты, содержащей присадки солей MgCl_2 и CaCl_2 , значение коэффициента теплопередачи упало до $3,95 \text{ кВт/(м}^2 \cdot \text{град)}$.

В течение этого опыта производительность кислотного насоса падала быстрее, чем обычно, и потребовалась промывка, так что вместо непрерывной работы на соленой воде установка была переключена на воду и промывалась в течение двух часов, а затем была отключена. В течение этих двух часов работы на воде были получены две группы данных, которым соответствовали значения коэффициента теплопередачи, равные $7,27$ и $7,16 \text{ кВт/(м}^2 \cdot \text{град)}$ (для чистой трубы коэффициент теплопередачи равен $8,48 \text{ кВт/(м}^2 \cdot \text{град)}$).

После этого установка снова была пущена и работала дополнительно 24 ч для исследования проблемы удаления накипи. Были получены еще две группы данных при температуре на входе 182°C и $\Delta T = 11^{\circ}$ со значениями коэффициентов теплопередачи, равными соответственно $7,7$ и $7,37 \text{ кВт/(м}^2 \cdot \text{град)}$.

Затем установка была отключена и охлаждена для получения образца оставшейся накипи. При визуальном исследовании трубопровода внутри оказался чистым, за исключением темно-фиолетовой окисной пленки. Однако были обнаружены следы утечки за верхней частью трубы, до уплотнительного кольца и красный плотный осадок на внешней поверхности трубопровода, свидетельствующий о том, что неполное восстановление коэффициента теплопередачи, возможно, связано с загрязнением внешней поверхности, или, возможно, окислением как внутренней, так и внешней поверхностей трубопровода.

ОБРАЗЦЫ

Во время этой серии опытов было взято только несколько образцов. Для первой части опытов фазы 2 (эксперименты с осаждением кремнезема) качественный анализ взятых образцов показал присутствие значительного количества железа, которое вначале приписыва-

лось влиянию коррозии всей установки. После выхода из строя линии подачи кислоты было установлено, что растворенное железо поступало именно из этого участка.

Анализ образцов соленой воды, содержащих взвешенные твердые частицы, проведенный Отделением аналитической химии Окридской национальной лаборатории, подтвердил наличие кремнезема в питательной соленой воде и показал, что по своему характеру осадок является аморфным (с помощью рентгенографического анализа не обнаружено кристаллической структуры).

Отфильтрованные образцы отложений, извлеченные из бомбы для образцов, установленной на выходе из испарителя, и образцы накипи, взятые из сливного конца трубы испарителя после эксперимента продолжительностью 13 ч, были проанализированы с помощью методов полукачественного спектрографического анализа и дифракции рентгеновского излучения. Наиболее важные анионы, обнаруженные с помощью спектрографического анализа, приведены в табл. 4.1. На рентгенограмме в области наиболее сильной линии SiO_2 виден ореол, свидетельствующий, что SiO_2 является аморфным образованием. В образце, взятом с фильтра были обнаружены NaCl и Fe_3O_4 , в то время как единственным, кроме SiO_2 , соединением, обнаруженным при анализе образца накипи, были следы Cu_2O .

Таблица 4.1

Результаты спектрографического анализа [1]

Образец	Осадок на фильтре, вес. %	Накипь в трубопроводе, вес. %
Fe	4	1
Cu	0,2	0,3
Ca	0,3	0,02
K	2	0,6
Na	10	5
Si	Большая часть	Большая часть
Ti	0,2	0,3

ПАДЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ

Измерения падения давления проводились во всех опытах. Была разработана усовершенствованная программа для расчета падения давления на вычислительной машине, основанная на модели, предложенной Стэндифордом, в которой учтены члены, связанные с по-

терями на трение, гидростатическим напором и потерями на ускорение [2]. Однако настоящая работа охватывает только весьма узкий интервал расходов (102 – 118 кг/ч). Расхождения, отмеченные между измеренными значениями в одинаковых рабочих условиях, могут быть обусловлены колебаниями расхода, тем что приемники давления (в гофрированном трубопроводе) не измеряли действительное статическое давление или существованием дрейфа элемента d/P .

В большинстве экспериментов, проводившихся на воде, измеренные значения падения давления составляли $\sim 140\%$ расчетного значения, но в опытах с соленой водой измеренные значения падения давления составляли только 44 – 80% расчетного значения. Поскольку на гидростатический напор приходится более 90% расчетного значения падения давления, то, очевидно, во время работы с соленой водой существовал другой тип течения, при котором уменьшается роль гидростатического напора. Например, это может быть связано с ростом пенообразования в потоке. Расчеты числа Рейнольдса свидетельствуют, что в экспериментах и с пресной, и с соленой водой реализуется режим двухфазного течения, имеющего в обеих фазах турбулентный характер.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

При использовании моделируемой соленой воды, содержащей ~ 800 мг/л SiO_2 , в высокотемпературном вертикально-трубном испарителе с восходящим потоком получены следующие основные результаты.

1) Образование накипи в испарителе происходит в пределах нескольких часов после пуска. В экспериментах, проведенных при температурах раствора на выходе (143 – 179 °C) коэффициент теплопередачи падает до 1/3 первоначального значения.

2) Образование накипи происходит при падении температуры смеси водяного пара и паров раствора на выходе от $\Delta T = 3^\circ$ до $\Delta T = 11^\circ$, причем скорость образования накипи растет с увеличением ΔT .

3) Дальнейшее охлаждение сбрасываемого из испарителя раствора после его смешения с конденсатом приводит к образованию накипи в охлаждающем элеваторе системы сброса. Эксперимент продолжительностью 13 ч был прерван из-за потери контроля за уровнем вследствие ограничения расхода через холодильник системы сброса.

4) Отложения накипи образуются как при наличии в них кальция и магния, так и в их отсутствие.

5) Кремнезем в образующихся отложениях имеет аморфное строение; слой накипи в течение нескольких часов приобретает постоянную толщину.

6) Накипь снова растворяется при работе на деминерализованной воде в течение ночи.

На основе этих результатов сделан вывод, что при использовании растворов, аналогичных по своим характеристикам исследуемому, на нагретых поверхностях испарителей геотермального раствора будут образовываться отложения кремнезема.

2. Анализ воды из скважин в районе Уайракей

Приведенные ниже результаты анализа воды из скважины № 20 геотермального поля в районе Уайракей в Новой Зеландии заимствованы из работы [3].

Жидкость в водоносном пласте движется к скважине в направлении падения давления, обусловленного более низкой плотностью двухфазной пароводяной смеси в скважине. Уменьшение давления вызывает сепарацию пара и понижение температуры. Эти процессы продолжают в скважине и в сепараторе, который работает при абсолютном давлении 1,63 МПа и температуре 202°C. При таком уменьшении давления и температуры рабочая жидкость содержит 10,1% пара.

Газы, первоначально растворенные в воде, переходят в значительной степени в газовую фазу (экспериментальные значения коэффициентов распределения CO_2 и H_2S подтверждают существование газовой фазы, особенно в окрестности температуры 200°C). При этой температуре пар сепарируется и отбирается для определения содержания CO_2 и H_2S . Пар и вода выходят из сепаратора через отдельные трубопроводы и вода затем направляется в успокоитель, который является по существу вторым сепаратором, работающим при атмосферном давлении и температуре (в районе Уайракей) 99°C.

Здесь дополнительно вскипает, превращаясь в пар, 20% начального количества воды, а остальная вода вытекает из водосливной камеры, где проводятся отборы проб. Пробы в закрытом полиэтиленовом сосуде охлаждаются и направляются в лабораторию, где проводится их анализ и измеряется значение pH. Растворенные в воде после сепарации CO_2 и H_2S не анализируются, поскольку их содержание предполагается пренебрежимо малым по сравнению с количеством газа, находящегося в газовой фазе.

Результаты анализа физических и химических свойств воды приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Результаты анализа воды и пара из скважины № 20 в районе Уайракей, Новая Зеландия [3]

Температура сепарации пара	202°C
Температура сепарации воды	202 и 99°C
Содержание CO_2 в паре высокого давления	142 ммоль/100 молей H_2O
Содержание H_2S в паре высокого давления	4,5 ммоль/100 молей H_2O
pH воды при 20°C	8,0

Компоненты	Концентрация, мг/л ¹⁾	Компоненты	Концентрация, мг/л ¹⁾
Li	14,8	Br	5,4
Na	1260	I	0,4
K	228	SO_4	35
Rb	3,0	B	26
Cs	2,5	HCO_3	7,7
Ca	25	CO_3	0
Mg	0	SiO_2	650
F	8,8	NH_3	0,3
Cl	2164	H_2S	0

¹⁾ Растворенные компоненты в воде определялись при 20°C.

3. Химический состав геотермального пара, получаемого при реализации Плоушерской программы

Приведенные ниже материалы заимствованы из работы [4], в которой описаны результаты двухмесячного исследования химического состава геотермального пара, получаемого при реализации Плоушерской программы.

Цель исследования заключалась в определении видов и концентраций радиоактивных и нерадиоактивных примесей, которые могут выноситься на поверхность выходящим паром.

Для осуществления этой цели потребовалось спроектировать и создать систему для определения коэффициентов распределения частиц пород в паровой и водяной фазах, разработать аналитические методы определения концентрации твердых веществ в воде и методы отбора проб пара и воды, находящихся при одинаковой температуре с образцами пород, извлеченными из полости, образованной после взрыва устройства "Пайлдрайвер". Ниже приведено описание эксперимен-

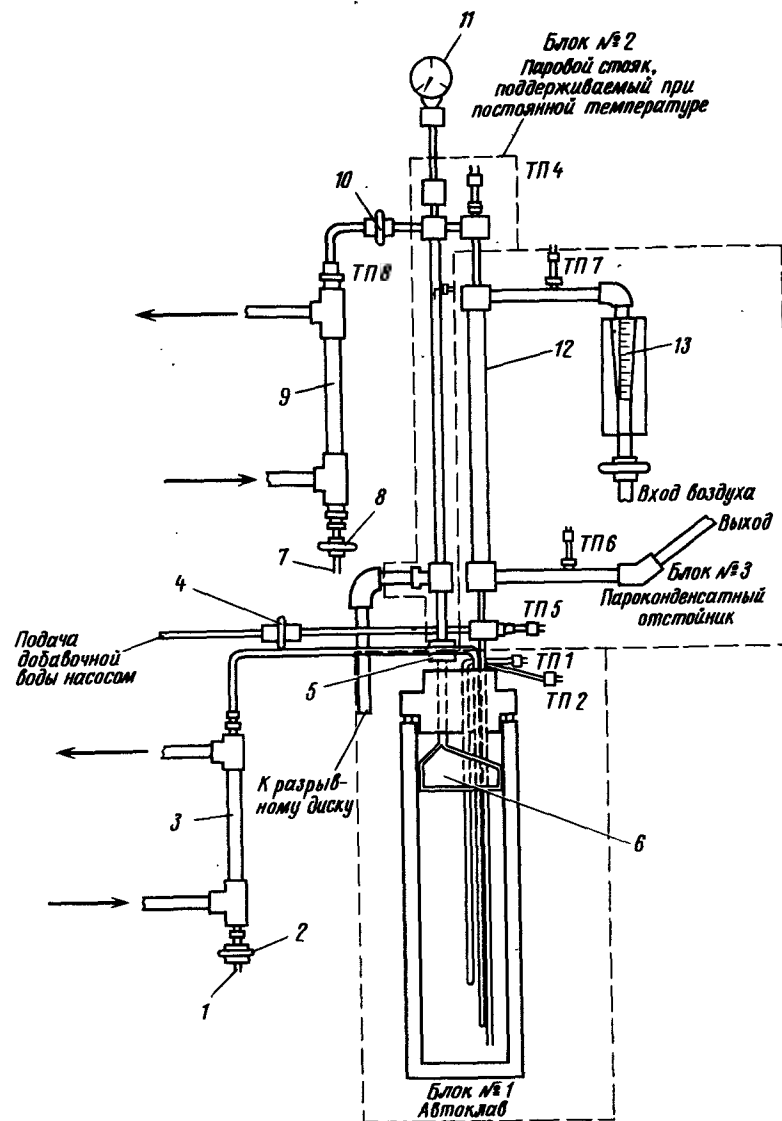
тальной установки, исследуемых материалов, режимов работы установки и используемых аналитических методов.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальная установка. Схема установки для определения коэффициентов распределения отдельных химических компонентов представлена на фиг. 4.5. Она состоит из трех основных блоков: 1) изготовленного из сплава инконель автоклава с электрическим обогревом емкостью 5 л, в котором находится вода, образцы породы и расположен каплеотбойник для отделения капель воды из струи выходящего пара, 2) изготовленного из сплава инконель парового стояка наружным диаметром 9,5 мм, поддерживаемого при постоянной температуре, на 3 – 5°С превышающей температуру автоклава благодаря размещению стояка в одном общем кожухе с нагревательным элементом и асбестовой изоляцией, и 3) изготовленного также из сплава инконель охлаждаемого воздухом отстойника для сбора конденсата наружным диаметром 6,25 мм, в котором пар конденсируется и образовавшийся конденсат возвращается в автоклав.

Как видно из фиг. 4.5, экспериментальная установка снабжена разнообразными приборами и устройствами для проведения необходимых измерений, включая окна для отбора проб, манометр и термопары для измерения температур в различных точках установки. Окна для отбора проб воды и пара включают в себя водоохлаждаемый конденсатор и два вентиля для регулирования скорости отбора пробы. Для заполнения системы после каждой операции по отбору пробы используется водяной насос. Давление измеряется с помощью манометра с верхним пределом измерений 34,5 МПа. Для обеспечения безопасной работы системы между автоклавом и поддерживаемым при постоянной температуре паровым стояком размещен предохранительный клапан, срабатывающий при максимальном давлении 24 МПа. Для измерения температуры системы были использованы восемь термопар.

С помощью термопары 1 измеряется температура воды, термопары 2, расположенной непосредственно над уровнем воды, — температура пара, термопары 3 и 4 — температура пара в нижней и верхней частях парового стояка, термопары 5 — температура парового конденсата в конце пароконденсатного отстойника, термопары 6 и 7 — температура воздуха на входе и выходе из конденсатора и термопары 8 — температура стенки парового стояка. Каплеотбойное устройство расположено в автоклаве непосредственно над поверхностью



Фиг. 4.5. Установка для измерения коэффициентов распределения химических компонентов [4].

1 — линия отбора проб воды; 2 — вентиль водяной линии; 3 — водяной теплообменник; 4 — вентиль подачи добавочной воды; 5 — вентиль водяной линии 1; 6 — каплеотбойник; 7 — линия отбора проб пара; 8 — паровой вентиль 2; 9 — водяной теплообменник; 10 — паровой вентиль 1; 11 — манометр с верхним пределом измерений 34,5 МПа; 12 — воздушный теплообменник; 13 — расходомер для воздуха; ТП1 — ТП8 — термопары 1 — 8.

кипящей воды с целью предотвращения уноса капель воды в блок парового стояка.

Испытываемый материал. Для анализа было получено около 3 кг гранитной породы из Лоуренсиейской радиационной лаборатории. Образцы породы представляют собой небольшие части бурового керна, извлеченного из нижней полусферы полости, образовавшейся при взрыве устройства "Пайлдрайвер". Они представляют породу из трещиноватой или обрушившейся зоны района взрыва, а также зоны самой полости.

Образцы расплавленной (спекшейся) и нерасплавленной породы помещаются в испытательный сосуд в том виде, в каком они были получены. Не предпринималось никаких попыток промыть или очистить образцы породы, а также увеличить площадь поверхности образца путем дробления или размалывания. Перед испытанием обломков темной спекшейся породы и обломков нерасплавленной породы исследовались с целью обнаружения в них основных изотопов, испускающих гамма-излучение. В обоих образцах были обнаружены одинаковые основные изотопы, но, как и ожидалось, расплавленный образец породы обладал на несколько порядков величины большей активностью, чем нерасплавленный образец. Были обнаружены следующие испускающие гамма-излучение изотопы: ^{60}Co , ^{106}Ru , ^{125}Sb , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{144}Ce , ^{144}Pr , ^{155}Eu , ^{154}Eu , ^{152}Eu .

Методика поведения эксперимента. Во время эксперимента автоклав заполняли водой в количестве 1800 мл, герметически закрывали и нагревали с помощью электрического обогревателя до требуемой рабочей температуры. Перед началом отбора проб всю систему при рабочей температуре выдерживали в течение 18 ч для установления равновесия в ней. Перед отбором проб на два часа включали паровой стояк и температуру в нем регулировали таким образом, чтобы показания термпары 8 на $2 - 5^\circ\text{C}$ превышали показания термпары 1. Расход воздуха через отстойник был отрегулирован таким образом, чтобы обеспечить практически полную конденсацию, но по возможности не допустить переохладение сконденсированной воды. Скорости конденсации паров в отстойнике были рассчитаны. Наблюдаемые скорости конденсации для водяного пара составляли 350, 350 и 250 г воды/мин при температурах соответственно 343, 288 и 232°C .

Использовали следующую методику отбора проб. Включали линию подачи холодной воды в холодильник системы отбора проб. Закрывали вентиль 2 на линии отбора проб, медленно открывали вен-

тиль 1 на той же линии и под эту линию устанавливали полиэтиленовую бутылку для проб, а вентиль 2 регулировали на расход ~ 10 мл/мин. Отбирали первую пробу 50 мл, которую не использовали для анализа. Пробы со второй по пятую, по 50 мл каждая, сохраняли для анализа. По окончании отбора проб вентиль 2, а затем и вентиль 1 закрывали, потом вентиль 2 снова открывали для дренажа линии отбора проб.

Пробы воды всегда брали перед отбором проб пара. Процедура отбора проб пара и воды в основном одинакова, за исключением того, что линия отбора воды отсоединяется около вентилей 1 и охлаждающий трубопровод промывается очищающими растворами с целью предотвращения потерь вещества из-за отложений в линии. Последовательность промывки для отсоединенной системы отбора следующая: 20 мл 20%-ной HCl , затем 20 мл дистиллированной воды, 20 мл 20%-ного NH_4OH и снова 20 мл дистиллированной воды. Анализ промывочных растворов показал, что во время охлаждения образцов воды имело место незначительное отложение веществ.

Автоклав снова заполняли после каждой операции по отбору проб воды и пара. Через водяной вентиль, расположенный перед автоклавом, в последний закачивали количество воды, равное объему взятой пробы. После заполнения автоклава водой восстанавливали прежние условия работы системы, которую выдерживали некоторое время при заданной температуре для достижения равновесия в ней перед новым отбором проб.

Методы анализа. Для обнаружения следов элементов в образцах воды и пара, находящихся в равновесии с радиоактивными (при очень низком уровне) образцами породы, требовались аналитические методы. Ниже перечислены использованные для обнаружения выбранных элементов аналитические методы, а также указаны нижние пределы чувствительности для каждого метода. Основой для выбора элементов являются опубликованные данные по составу гранитных пород и ожидаемым продуктам деления.

При выборе аналитических методов должны учитываться следующие факторы: низкая концентрация представляющих интерес элементов в горных породах, радиоактивный распад радиоактивных изотопов с малым и промежуточным периодами полураспада, например с $t_{1/2} = 6$ мес, и, наконец, помехи, создаваемые каким-либо элементом при использовании аналитических методов для обнаружения других элементов.

Ясно, что коэффициенты распределения радиоактивных изотопов имеют большое значение при анализе геотермального пара, получае-

Элемент	Метод анализа	Предел чувствительности
Алюминий	Азурол хрома S (колориметрический)	3 мкг/л (ячейки 10 см)
	Атомная абсорбционная спектроскопия	0,3 мкг/л
Сурьма	Эриохром-цианин R (колориметрический)	10 мкг/л (ячейка 1 см)
	Гамма-спектроскопия	$20 - 10^{-6}$ мкг/л ¹⁾
	Азур С (колориметрический)	20 мкг/л (ячейка 1 см)
Бор	Атомная абсорбционная спектроскопия	0,5 мкг/л
	Пламенная спектроскопия	10 мкг/л
Кальций	Атомная абсорбционная спектроскопия	10 мкг/л
Церий	Гамма-спектроскопия	$20 - 10^{-6}$ мкг/л ¹⁾
Цезий	Гамма-спектроскопия	$20 - 10^{-6}$ мкг/л ¹⁾
Кобальт	Атомная абсорбционная спектроскопия	10 мкг/л
	Активационный анализ	$20 - 10^{-6}$ мкг/л ¹⁾
Медь	Пламенная спектроскопия	25 мкг/л
	Атомная абсорбционная спектроскопия	10 мкг/л
Железо	Пламенная спектроскопия	200 мкг/л
	Атомная абсорбционная спектроскопия	25 мкг/л
	Феррозин (колориметрический)	2 мкг/л (ячейки 10 см)
Магний	Пламенная спектроскопия	100 мкг/л
	Атомная абсорбционная спектроскопия	1 мкг/л
	Эриохром черный Т (колориметрический)	10 мкг/л (ячейки 1 см)
Марганец	Пламенная спектроскопия	20 мкг/л
	Атомная абсорбционная спектроскопия	1 мкг/л
Калий	Пламенная спектроскопия	1 мкг/л
Рутений	Гамма-спектроскопия	$20 - 10^{-6}$ мкг/л ¹⁾
Кремнезем	Молибденовая синь (колориметрический)	3 мкг/л (ячейки 10 см)
	Атомная абсорбционная спектроскопия	0,5 мкг/л
Натрий	Пламенная спектроскопия	0,2 мкг/л
Стронций	Атомная абсорбционная спектроскопия	1 мкг/л
	Пламенная спектроскопия	20 мкг/л

¹⁾ Чувствительность определения содержания элементов методом гамма-спектроскопии изменяется в широких пределах в зависимости от величины помех, создаваемых другими присутствующими в образце радиоактивными изотопами, полной величины гамма-сигнала от образца, времени активации, времени счета, периода полураспада и т.п.

мого при реализации Плоушерской программы. Был использован непосредственный гамма-анализ как радиоактивных компонентов, так и образцов с повышенным содержанием последних (добавка 50 мкг/л + активация нейтронами).

При определении содержания нерадиоактивных компонентов использовались модификации известных аналитических методов, таких, как методы атомной абсорбции, пламенная эмиссионная спектроскопия, эмиссионная спектроскопия и колориметрические методы. В табл. 4.3 приведены определяемые элементы и указаны методы анализа, а также нижние пределы чувствительности каждого метода. Ниже перечислены вещества, используемые при колориметрических методах анализа, и указаны источники, в которых описаны подобные методы: азурол хрома S [5], эриохром-цианин R [6], азур С [7], феррозин [8], эриохром черный Т [9], молибденовая синь [10].

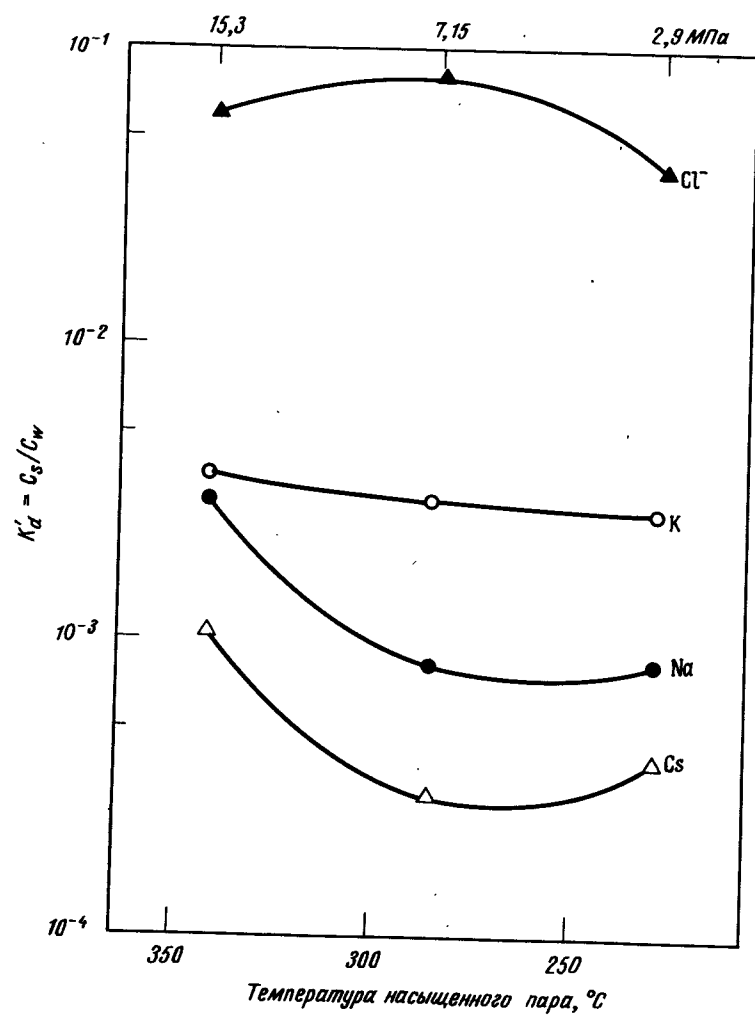
Аналитические результаты представлены как простое усреднение данных, полученных на основании одной или более аналитических процедур. Анализ проведен для всех перечисленных в табл. 4.3 элементов. В тех случаях, когда содержание элемента в пробах воды не превышало 100 мкг/л, анализ образцов пара не проводился, за исключением случаев, когда оказался применимым метод гамма-спектроскопии.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Примеси, выщелачиваемые с помощью воды и пара. Практически все из проведенных ранее исследований коэффициентов распределения проводились с использованием простых систем, т.е. систем, состоящих из растворенного в чистой воде одного соединения. Кажущийся коэффициент распределения K_d' определялся по полным концентрациям элемента в конденсате пара (C_s) и воде (C_w), т.е. в грубом приближении он зависит от отношения C_s/C_w . Описание метода определения коэффициента K_d' можно найти в работе [4, стр. 13 – 28].

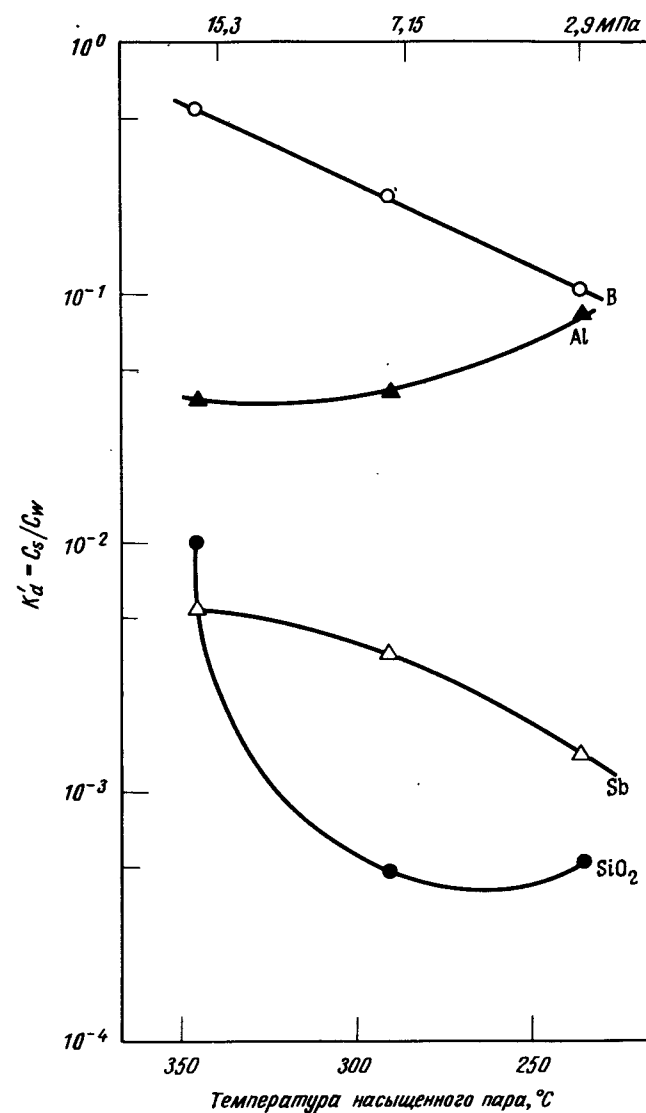
Определение химического состава смешанной окись-гидроокисной системы, полученной при этих условиях, оказывается весьма сложной задачей, поскольку ионное состояние любого элемента в растворе зависит от ионных состояний и растворимостей всех других соединений в растворе.

На основе этого предположения с учетом того, что SiO_2 является основным компонентом гранита и оказывается относительно растворимым соединением, вполне целесообразно предположить, что коэффициент K_d' кремнезема будет менее всего зависеть от изменений ионного состояния или растворимостей всех других компонентов, как это следует из эксперимента.



Фиг. 4.6. Кажущиеся коэффициенты распределения для ионов хлора и щелочных металлов [4].

На фиг. 4.6 и 4.7 приведены коэффициенты распределения в зависимости от температуры насыщенного пара. Предварительные исследования процесса выщелачивания образцов породы при температуре 343 °C показали, что наиболее важные радиоактивные изотопы, такие, как Eu, Ru, Ce и Co, не выщелачиваются из образцов в доста-



Фиг. 4.7. Кажущиеся коэффициенты распределения для Al, B, Sb и SiO_2 [4].

точных количествах для непосредственного обнаружения методом гамма-спектроскопии. Более того, даже выщелачиваемые радиоактивные элементы, такие, как Sb и Cs, присутствуют в воде в таких незначительных количествах, что эти величины чуть выше порога чувствительности при обнаружении вещества в пробах воды. Остается невыясненным вопрос, обусловлена ли низкая концентрация этих радиоактивных изотопов 1) радиоактивным распадом вследствие возраста образцов (~ 6 лет), 2) низкой скоростью процесса выщелачивания или 3) нерастворимостью соединений, содержащих радиоактивные изотопы. Если низкие концентрации радиоактивных элементов обусловлены процессами (1) или (2), то изотопное разбавление, вызываемое активацией нейтронами, сделает возможным определение коэффициентов распределения для интересующих нас радиоактивных элементов. Поэтому в воду были добавлены такие элементы, как Cs, Sb, Ru, Co и Se в количестве по 50 мг/л в виде соединений типа окислов или нитратов. В отдельных сериях опытов в виде окисла был введен также элемент Eu в количестве 50 мг/л. При этом потребовалось отделение Eu от других изотопов, с тем чтобы исключить возможные помехи в счете, обусловленные сложным характером спектра гамма-излучения Eu.

Полученные на основании активационного анализа результаты показывают, что практически одни и те же элементы доминируют в растворе, т.е. малые количества Sb (максимум ~ 2 мг/л) и Cs (максимум 0,1 мг/л). В пробах водной или паровой фаз обнаружены также незначительные количества Co, однако уровень концентрации Co таков, что его можно отнести к продуктам коррозии таких материалов, как инконель или нержавеющая сталь. Другие вводимые элементы, такие, как Ru, Se и Eu, не присутствовали в заметных количествах. Отсюда сделан вывод, что низкие концентрации этих элементов в паре и воде объясняются низкой растворимостью химических соединений, в которых они присутствуют.

Расчетные значения коэффициентов распределения приведены в табл. 4.4 и на фиг. 4.6 и 4.7. Ожидалось, что в простой системе коэффициенты распределения не будут зависеть от концентрации и температуры вблизи значения критической температуры. Вследствие сложной химической природы исследуемой системы такое простое соотношение не выполняется. Для некоторых анализируемых компонентов, например, натрия, обнаружена инверсия растворимости в воде.

Данный результат не является неожиданным, поскольку известно, что силикат натрия характеризуется инверсией растворимости.

Таблица 4.4

Концентрация в жидкой фазе и кажущиеся коэффициенты распределения для системы пар — вода [4]

Элемент	Температура, °C					
	343		288		232	
	концентрация в жидкой фазе, мг/л	коэффициент распределения	концентрация в жидкой фазе, мг/л	коэффициент распределения	концентрация в жидкой фазе, мг/л	коэффициент распределения
Кремний (SiO ₂)	1000	10^{-2}	800	$5 \cdot 10^{-4}$	600	$5 \cdot 10^{-4}$
Натрий	20	$3 \cdot 10^{-3}$	50	$8 \cdot 10^{-4}$	60	$9 \cdot 10^{-4}$
Калий	10	$4 \cdot 10^{-3}$	20	$2 \cdot 10^{-3}$	30	$2 \cdot 10^{-3}$
Хлор	12	$6 \cdot 10^{-2}$	14	$6 \cdot 10^{-2}$	20	$4 \cdot 10^{-2}$
Алюминий	5	$4 \cdot 10^{-2}$	6	$4 \cdot 10^{-2}$	8	$6 \cdot 10^{-2}$
Сурьма ¹⁾	2	$6 \cdot 10^{-3}$	1	$4 \cdot 10^{-3}$	1	10^{-3}
Бор	1	$6 \cdot 10^{-1}$	0,7	$3 \cdot 10^{-1}$	0,8	$2 \cdot 10^{-1}$
Цезий ¹⁾	0,06	10^{-3}	0,1	$3 \cdot 10^{-4}$	0,1	$4 \cdot 10^{-4}$
Железо	0,1	—	0,05	—	0,04	—
Кобальт ¹⁾	0,05	—	0,03	—	0,03	—
Марганец	0,02	—	0,01	—	0,01	—
Кальций	< 0,01	—	< 0,01	—	< 0,01	—
Медь	< 0,005	—	< 0,005	—	< 0,005	—
Стронций	< 0,005	—	< 0,005	—	< 0,005	—
Магний	< 0,002	—	< 0,002	—	< 0,002	—
Церий ¹⁾	< 0,02	—	< 0,02	—	< 0,02	—
Рутений ¹⁾	< 0,02	—	< 0,02	—	< 0,02	—
Европий ¹⁾	< 0,02	—	< 0,02	—	< 0,02	—

¹⁾ При проведении эксперимента в воду добавляли 50 мг/л указанного элемента в виде окисла или нитрата.

Приведенные на фиг. 4.6 и 4.7 результаты не могут быть отнесены к породам другого химического состава. Более того, нет никакой уверенности в том, что выявлены все возможные, вызывающие наибольшие затруднения компоненты. Однако можно надеяться, что если образцы пород сходного состава приведены в состояние равновесия при исследуемой температуре, то представляющие основной интерес компоненты будут определяться соотношением, подобным приведенному на фиг. 4.6 и 4.7.

Анализ отложений в автоклаве. По окончании исследований процесса выщелачивания образцов пород было обнаружено, что стенки автоклава покрыты плотными хлопьевидными отложениями, выходящими за пределы наблюдаемого уровня воды. Вещество этих отложений было устойчивым по отношению к концентрированной соляной кислоте, азотной кислоте, царской водке и 50%-ному раствору каустика даже при нагревании до $\sim 90^\circ\text{C}$. Единственным эффективным методом растворения отложений оказалось погружение их на 3–5 ч в 48%-ный раствор плавиковой кислоты. Для идентификации отложений на стенках автоклава был проведен химический и радиохимический анализ. Результаты этого анализа приведены в табл. 4.5 и 4.6.

Согласно результатам, представленным в табл. 4.5, образование хлопьев происходило в основном за счет испарения и, возможно, разбрызгивания непосредственно над уровнем воды. Это, очевидно, вытекает из того факта, что обнаруженные радиоактивные компоненты имеют приблизительно такое же соотношение элементов, что и компоненты, присутствующие в пробе воды.

Таблица 4.5

Сравнение результатов радиохимического анализа отложений на стенках автоклава, образцов породы и воды [4]

Вещество	Отношение	
	$^{137}\text{Cs}/^{134}\text{Cs}$	$^{125}\text{Sb}/^{134}\text{Cs}$
Проба воды	2,7	3,6
Образцы породы	1,4	0,53
Хлопьевидные отложения в автоклаве	2,6	3,0

Таблица 4.6

Состав хлопьевидных отложений по сравнению с другими образцами. Спектры излучения [4]

Элемент	343°C		Порода, %	Хлопья, %
	проба воды, мг/л	проба пара, мг/л		
Ag	0,004	—	—	0,001
Al	4,8	0,09	7,4	2,0
B	1,3	0,7	0,85	1,1
Ca	0,2	< 0,02	5	0,5
Cr	0,02	0,002	—	0,02
Cu	0,008	0,0008	0,0005	0,01
Fe	0,1	0,08	2	0,2

Продолжение табл. 4.6

Mg	0,008	0,004	0,02	0,005
Na	20	0,1	1,3	0,42
Sb	1,7	0,009	—	0,2
Si (в виде SiO_2)	1000	15	65	90
V	0,08	—	0,02	0,05
Ru	< 0,02	< 0,02	?	Следы

ВЫВОДЫ

В ходе этого исследования создана система для изучения процесса выщелачивания и переноса с паром компонентов горных пород в интервале температур, представляющем интерес с точки зрения работы геотермальной электростанции. Были выбраны подходящие методы анализа радиоактивных и нерадиоактивных веществ, выщелоченных из подверженной воздействию ядерного взрыва породы и перенесенных в паровую фазу. Измерены коэффициенты распределения этих соединений для системы пар — вода при температурах 343, 288 и 232°C .

Полученные результаты показывают, что химическая природа системы порода — вода является весьма сложной. Оказалось, что на полную растворимость элемента и отношения ионных компонентов, содержащих этот элемент, могут влиять растворимости и ионные состояния других компонентов породы, а также значения pH и концентрации ионов кислорода. Эти сложные взаимодействия приводят к таким значениям кажущегося коэффициента распределения для системы пар — вода, которые в общем случае не следуют простому линейному соотношению, справедливому для систем с одним растворенным веществом. Показано, что некоторые радиоактивные продукты, такие, как изотопы Eu, Ru и Se, характеризуется столь низкими значениями растворимости в условиях проводимого исследования, что их наличие в породе не должно создавать проблем для будущих электростанций на геотермальном паре. Другие же изотопы, как ^{137}Cs и ^{125}Sb , характеризуются достаточно высокой растворимостью, и их перенос в геотермальном паре может вызвать определенные трудности.

Кремнезем является основным растворимым компонентом горной породы, который составляет 80% и более всех растворенных в воде веществ. Из исследуемых компонентов предсказываемые характеристики растворимости кремнезема оказываются наиболее близкими к характеристикам, наблюдаемым в простых системах с одним растворенным веществом.

Литература

1. Harley P.H., SiO₂ Scale Formation in Simulated Geothermal Brine, ORNI-TM 4137, June 1973.
2. Standiford F.C., Relative Economics of Upflow Versus Downflow VTE Evaporators and Development Program for Upflow VTE Evaporator, Report 517, April, pp. 23 – 25, 1972.
3. Truesdell A.H., A Computer Program for the Calculation of Aquifer Chemistry in Hot-Water Geothermal Systems, PB 219, 376, 1973, ENTHALP.
4. Charlot L.A., Morgan W.C., Warner I.M., Plowshare Geothermal Steam Chemistry Introductory Studies BNWL-1614, Battelle, Pacific Northwest Laboratories, July 1971.
5. Pakalns P., Spectrophotometric Determination of Aluminum with Chrome Azurol S, *Analytica Chimica Acta*, **32**, 57 – 63 (1965).
6. Langford G.C., Flamephotometer and Colorimetric Procedures, BNWL-CC-849, Pacific Northwest Laboratory, Richland, Washington, September 1966.
7. Pasztor L., Bode J.D., Thionin Derivatives in the Extraction and Direct Photometric Determination of Boron, *Analytica Chimica Acta*, **24**, 467 – 473 (1961).
8. Stookey L.L., Ferrozine—A New Spectrophotometric Reagent for Iron, *Analytical Chemistry*, **42**, No. 7, pp. 779 – 781 (1970).
9. Harvey A.E., Komarmy J.M., Wyatt G.M., Colorimetric Determination of Magnesium with Eriochrome Black T, *Analytical Chemistry*, **25**, No. 3, 498 – 500 (1963).
10. Kenyon O.A., Berwick H.A., Photometric Determination of Silica in Alkalies, *Analytical Chemistry*, **25**, No. 1, 145 – 148 (1953).

5

ИССЛЕДОВАНИЕ
ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ
КАЛИФОРНИИ

В работе [1], откуда заимствован приведенный ниже материал, предпринята попытка описать природу геотермальных ресурсов, их размеры и возможную технологию их эксплуатации. Результаты первоначальных исследований и доклад комитету по исследованиям Генеральной ассамблеи конгресса шт. Калифорния были представлены Голдсмитом и Рольфом. Основные положения и выводы сформулированы рабочей группой по разработке программ и планированию в области энергетики.

Природа ресурсов

Расширение знаний об основных силах, действующих внутри Земли, способствует более глубокому пониманию природы источников геотермальной энергии. С давних пор люди отмечали в различных местах на поверхности земли проявления тепловой активности ее недр. К этим проявлениям относятся гейзеры, термальные источники или струи пара, выходящие из трещин в земле. В таких местах иногда бурили скважины, чтобы попытаться использовать энергию подобных источников в полезных целях. Во многих случаях, которых сейчас становится все больше, эти усилия увенчались успехом в том смысле, что из скважин получали значительные количества горячего пара и горячей воды.

Что же является источником геотермального тепла? Известно, что температура пород, слагающих земную кору, растет с увеличением глубины. Предполагается, что эти температуры достигают весьма высоких значений в центральной части земных недр. В настоящее время считается, что источником этого тепла является распад радиоактивных элементов с большим периодом полураспада, а также фрикционные (приливные) силы.

Были проведены исследования, чтобы выяснить, можно ли обогреть нагревание такой рабочей среды, как вода, путем пропуска

ее по скважине, пробуренной в теплых зонах земной коры, где она нагревается и затем возвращается на поверхность земли. Тепло этой воды можно использовать, например, для получения электроэнергии. Земная кора образована гигантскими континентальными плитами, которые перемещаются относительно друг друга с образованием разломов между ними. Более горячие вещества из недр поднимаются за счет циркуляции вдоль стыков между этими плитами. В областях подъема земная кора оказывается тоньше и пронизана трещинами. В этих областях тепловой поток из глубины к поверхности земли существенно превышает средние его значения. Это означает, что породы фундамента в таких областях могут оказаться более горячими, чем этого можно ожидать для таких материалов на данной глубине в других местах Земли.

Одна из таких больших областей разломов расположена в восточной части Тихого океана и доходит до Калифорнийского залива. Фактически отделение полуострова Нижняя Калифорния от материковой Мексики является результатом образования рифтовой зоны между континентальными плитами. Продолжением этого океанского разлома является зона разлома Сан-Андреас. Известно, что вдоль этой зоны существует ряд тепловых аномалий.

Если подземные воды будут протекать через подобную нагретую зону, то они в свою очередь тоже нагреются. В некоторых областях отмечаются поверхностные проявления тепловой активности в виде гейзеров или горячих источников. Именно в этих областях проводится разведка геотермальных ресурсов. До недавнего времени считалось, что подобные термоявления связаны только с зонами разломов и что массы воды под поверхностью земли имеют локализованный характер.

Однако лучшее понимание геологических условий и выяснение того факта, что некоторые из геотермальных полей охватывают площади, значительно превышающие площадь локализованных зон разломов, заставило геологов пересмотреть свои теории относительно природы геотермальных районов. Не вдаваясь в детали научных фактов или аргументов, достаточно сказать, что теперь считают, что во многих случаях геотермальные районы могут занимать значительные площади и характеризоваться значительными объемами нагретых пород.

В начальные периоды разведки нефтяных месторождений скважины обычно бурили в местах выхода нефти на поверхность, но дальнейшее развитие теории и практики нефтяного дела позволило нахо-

дить нефть даже под морским дном. Аналогично разведка геотермальных ресурсов находится на ранних стадиях своего развития; поэтому внимание исследователей сосредоточено на областях с поверхностными проявлениями тепловой активности. Однако с учетом опыта современной геологии можно надеяться на быстрый прогресс в разработке методов обнаружения геотермальных ресурсов и в отсутствие выходов тепла на поверхность земли.

При бурении скважин с целью использования геотермальных ресурсов обнаружены определенные условия функционирования скважин. В одних случаях получают сухой пар, не сопровождаемый водой. Такие условия характерны для одного из самых старых геотермальных паровых полей в Лардерелло в Италии, а также для месторождения природного пара в Долине Больших Гейзеров в северной Калифорнии, которое в настоящее время используется для производства электроэнергии фирмой "Пэсифик гэз энд электрик". В этом случае подземные воды, нагреваясь при прохождении через горячие породы под поверхностью земли, вскипают с образованием пара и под землей формируется большой паровой бассейн, содержащий пар под повышенным давлением. Этот пар на выходе из пробуренной скважины может быть использован для полезных целей.

В других случаях геотермальные скважины вскрывают в недрах исключительно горячую воду, которая вследствие размещения на глубине и особенностей конфигурации таких бассейнов находится обычно под высоким давлением. Скважина, вскрывшая нагретую воду, может быть использована для понижения давления воды в части бассейна. При понижении давления очень горячей воды часть ее вскипает, превращаясь в пар. Пар в процессе образования и расширения будет стремиться выйти из ствола скважины, увлекая с собой при этом значительное количество воды. В этом случае из скважины будет поступать смесь пара и воды при еще очень высокой температуре, хотя и несколько охлажденная за счет процессов вскипания и расширения, имеющих место при прохождении потока через скважину.

На выходе скважины пар и вода могут быть разделены простым центробежным устройством, называемым иногда циклонным сепаратором. Смесь проходит через сепаратор, из одной трубы которого получают воду, а из другой — пар. Поскольку пар и вода находятся в термодинамическом равновесии, т.е. при одинаковых температурах и давлениях, то такой пар называется насыщенным. Такой тип геотермальных источников был обнаружен в Новой Зеландии, Мексике, долине Импириал-Валли и в других местах.

Воды в различных месторождениях различны по составу. В Новой Зеландии такие воды характеризуются очень низкой минерализацией. Там пар используется для получения электроэнергии, а вода просто сбрасывается в море. Для Новой Зеландии характерно обилие осадков, и поэтому геотермальные воды как источник пресной воды обладают малой ценностью. Геотермальные воды, обнаруженные в долине Импириал-Валли, вблизи озера Солтон-Си (в области, называемой Батс), являются совершенно противоположным примером. Содержание растворенных минеральных веществ в этих водах исключительно высоко, достигая 30 вес. %, в то время как в морской воде концентрация растворенных минеральных веществ составляет всего 3,3%. Вследствие высокого содержания минеральных веществ, пар, получаемый из таких скважин, оказывает коррозионное воздействие, и его очень трудно использовать в электрогенераторных установках, что было показано на маломасштабных экспериментах. Однако основной целью разработки геотермальных ресурсов в области Батс является получение химических продуктов из высококонцентрированных рассолов. Эта цель относится к одной из возможных и при разработке геотермальных ресурсов вообще, т.е. получение химических продуктов из геотермальных вод в качестве основного продукта или в качестве побочного продукта других процессов.

Другой тип подземных вод обнаружен в области Серро-Прието в северной части полуострова Нижняя Калифорния. Здесь воды в подземном бассейне не являются ни пресными, ни сильно засоленными. Геотермальная вода в Серро-Прието содержит ~2,5% растворенных минеральных веществ, т.е. она является слишком соленой для использования в качестве питьевой воды или для орошения, но пар, полученный из этих скважин, по своим характеристикам вполне подходит для использования на электростанции. В настоящее время в Мексике сооружается электростанция мощностью 75 МВт, которая будет использовать пар, полученный из геотермального поля Серро-Прието.

В общем случае вода, выходящая из сепаратора, установленного на выходе из скважины, оказывается горячей. В то время как пар может быть использован для выработки электроэнергии или для других целей, вода также может найти применение. Конечно, в некоторых случаях она может быть просто сброшена в океан или закачана снова под землю. Но, как уже отмечалось, она может быть также использована для извлечения минеральных веществ. Серьезного рассмотрения заслуживает вопрос об обработке геотермальной воды

в опреснительной установке, где из нее удаляются растворенные минеральные вещества и получается пресная вода, пригодная для сельскохозяйственного, городского или промышленного использования. Это особенно важно для долины Импириал-Валли и других засушливых районов в западной части США. В Калифорнии еще не признан экономически выгодным процесс получения пресной воды из морской воды. Однако, поскольку геотермальные воды уже нагреты, то вполне возможно, что их опреснение окажется более дешевым, чем опреснение морской воды, и, следовательно, такие воды могут стать ценным ресурсом.

Если отсепарированная вода не используется, то с учетом ее химического состава нужно воспрепятствовать ее попаданию в поверхностные воды или в неглубоко расположенные водоносные пласты, где она может смешаться с водой из других источников. В этом случае либо должна быть создана система для транспортировки воды в океан (если это допустимо), либо вода должна закачиваться глубоко под землю, возможно, до уровня продуктивной зоны.

В заключение следует отметить, что природа геотермального источника проявляется в двух формах: в виде сухого пара и в виде очень горячей воды в подземном бассейне. В последнем случае воду можно извлечь из скважины с помощью насоса, не допуская падения давления и, таким образом, исключая образование пара. С другой стороны, давление можно уменьшить, что приведет к вскипанию воды с образованием пара; полученную смесь пара и воды на выходе из скважины можно затем отсепарировать. Месторождения с горячей водой можно подразделить на месторождения с пресной, сильно минерализованной водой и водой промежуточного солоноватого типа. Это деление отражает как полезность самого геотермального источника, так и технические проблемы, возникающие при его использовании.

Размеры ресурсов

В ряде опубликованных недавно отчетов описываются известные местонахождения геотермальных ресурсов шт. Калифорния. Эти данные были собраны как федеральными службами, так и службами штата и опубликованы в различных формах. Известные местонахождения геотермальных ресурсов, установленные Геологической службой США, были опубликованы в федеральном регистре и перепечатаны в специальном выпуске [2] шт. Калифорния.

По этим оценкам полная площадь, занятая в Калифорнии геотермальными ресурсами, превышает 4000 км², но не следует полагать,

что все эти ресурсы разведаны. В отчете [3] приведен список известных геотермальных областей в Калифорнии.

В указанном документе геотермальные области делятся на такие области, где уже производится энергия, где уже разведаны геотермальные ресурсы, области потенциально перспективные с точки зрения выработки энергии и другие. К этим другим областям относятся, например, местоположения различных термальных источников в штате. Потенциально перспективными называются области, в которых предполагается существование значительных геотермальных ресурсов, но подробная разведка которых еще не проводилась. Без такой разведки невозможно сделать какие-либо оценки потенциальной важности этих областей. Три области в пределах штата привлекли наибольшее внимание в последнее время, и именно они будут рассмотрены ниже. Это долина Больших Гейзеров, в которой в настоящее время вырабатывается электроэнергия на базе геотермальных ресурсов, графство Импириал и район между озером Моно-Лейк и Каса-Дьябло.

ДОЛИНА БОЛЬШИХ ГЕЙЗЕРОВ

В Долине Больших Гейзеров группа фирм, возглавляемая фирмой "Юнион ойл", пробурила ряд скважин для получения пара, который она продает фирме "Пэсифик гэз энд электрик". Последняя использует этот пар для выработки электроэнергии и рассчитывается с поставщиками пара на основе выработанной электроэнергии в киловатт-часах. Первый турбогенераторный блок (Гейзеры № 1) вступил в строй в сентябре 1960 г. Его мощность составляла 12 МВт в непрерывном режиме работы. Эта первая опытно-промышленная установка оказалась удачной, и в течение 60-х годов фирма "Пэсифик гэз энд электрик" увеличила мощность станции до 83 МВт к 1968 г. Были пущены четыре отдельных турбогенераторных блока. В 1971 г. вступили в строй блоки № 5 и 6 каждый мощностью 55 МВт. Фирма объявила о своем намерении увеличивать мощность электростанции "Большие Гейзеры" на 110 МВт в год до достижения 600 МВт.

В отчете [4] указывается, что в течение 1979 г. будут дополнительно введены в действие 8 турбогенераторов мощностью 53 МВт каждый. Предполагается, что все они будут расположены в окрестности геотермального поля "Большие Гейзеры". Таким образом, в 1979 г. фирма "Пэсифик гэз энд электрик" намеревается довести установленную мощность своей системы до 1000 МВт, что приблизи-

тельно эквивалентно мощности одной современной атомной электростанции. Сотрудники фирм "Пэсифик гэз энд электрик" и "Юнион ойл" утверждают, что мощность геотермального поля "Большие Гейзеры" составляет по крайней мере 1000 МВт.

Сообщается, что площадь разведанного месторождения пара превышает $\sim 26 \text{ км}^2$. Дальнейшая разведка может показать, что даже эта оценка является заниженной. В настоящее время скважины для получения пара расположены таким образом, что на площади в $\sim 0,16 \text{ км}^2$ размещается одна скважина (последние скважины в среднем обеспечивают количество пара, достаточное для выработки 8 МВт электрической мощности каждая). Однако, согласно некоторым оценкам возможно такое расположение скважин, при котором на каждую скважину приходилась бы площадь, равная $0,08 \text{ км}^2$. На выходе из скважины здесь получают сухой, немного перегретый пар без воды. Выходящий пар собирается и поступает в парогенератор, где он после прохождения через турбину конденсируется. Полученная при этом вода испаряется в градирнях, и только небольшая часть этой воды закачивается в землю. Пока еще не выяснен вопрос о полном времени поддержания производительности геотермального поля "Большие Гейзеры".

Истощение поля оценивается при падении давления на выходе из скважины 5% в год. Предполагается, что истощение поля обусловлено тем, что приток воды к паровому полю оказывается меньшим ее расхода. Фирма "Пэсифик гэз энд электрик" оценивает срок амортизации своих капиталовложений в 35 лет.

ДОЛИНА ИМПИРИАЛ-ВАЛЛИ

Второй областью в Калифорнии, привлекающей пристальное внимание, является Долина Импириал-Валли. Вблизи юго-восточного побережья озера Солтон-Си давно отмечались такие поверхностные проявления, как фумаролы и грязевые купола. В 1927 г. здесь была пробурена скважина, но оказалось, что производимого ею пара недостаточно для промышленного производства электроэнергии. Однако получаемая из месторождения двуокись углерода в газообразном состоянии использовалась в течение многих лет для получения сухого льда, пока скважина не была затоплена вследствие повышения уровня в озере Солтон-Си. В долине Импириал-Валли проводились также изыскания нефти, и в 1957 г. пробуренная разведочная нефтяная скважина вскрыла горячие воды на глубине $\sim 1500 \text{ м}$. Поскольку при этом не было обнаружено ни нефти, ни газа, снова возник интерес к использованию геотермальных ресурсов. Впоследствии были пробурены до-

полнительные скважины в области, известной под названием геотермального поля Батс; ряд этих скважин был предназначен для получения различных минеральных веществ из высококонцентрированного раствора.

В указанной области обнаружен подземный бассейн очень горячей воды, которая по мере продвижения по скважине вскипает с образованием смеси пара и воды. Содержание минеральных веществ в этой воде достигает 25–30 вес. %. Проблемы бурения скважин в этой области подробно рассмотрены в работе [5], а обзор положения, связанного с извлечением минеральных веществ из рассола, приведен в работе [6].

Несмотря на тот факт, что многие миллионы долларов были вложены в бурение скважин и производственное оборудование, изменения в структуре цен на химические продукты, такие, как поташ, помешали успешной экономической разработке этих минеральных ресурсов. Эксперименты по производству электрической энергии с использованием пара, получаемого из этих скважин, также оказались неудачными вследствие сильного коррозионного воздействия рассола. По этим причинам дальнейшая разведка геотермальных ресурсов в долине Импириал-Валли в течение ряда лет была приостановлена. Несмотря на очевидные большие запасы нагретой до высокой температуры воды, содержание минеральных веществ в последней казалось непреодолимым препятствием на пути к успешной промышленной эксплуатации этого геотермального поля.

Мексиканские исследования и разработка месторождения пара в Серро-Прието послужили новым стимулом к интенсивной разведке геотермального потенциала долины Импириал-Валли, расположенной между озером Солтон-Си и мексиканской границей. Большая часть этих исследований проведена доктором Рексом из Калифорнийского университета и его группой.

В работе [7] Рекс указывает, что геотермальное поле Батс характеризуется двумя разными типами геотермальных рассолов: на большей глубине находится очень горячий рассол с очень высокой концентрацией солей, а над ним — более холодный рассол с меньшей концентрацией солей. Анализ геологических данных и данных, полученных при бурении скважин, показывает, что граница раздела между этими рассолами отклоняется к югу.

Таким образом, Рекс полагает, что на глубине ~1500 м, которая считается приемлемой с точки зрения практического использования, к югу от долины Импириал-Валли находятся соленые рассолы, подобные обнаруженным в Серро-Прието. Глубина залегания пород основания в Импириал-Валли очень велика, возможно 6000 м, и предполагается, что артезианский бассейн образован пористыми осадочными формациями.

В работе [8] Рекс приводит оценки полного объема воды, содержащейся в бассейне Импириал-Валли. Согласно его оценкам, в осадочных образованиях содержится свыше $1,2 \cdot 10^3$ км³ воды, причем, как отмечает сам Рекс, эти оценки являются весьма осторожными. По менее осторожным оценкам объем воды достигает $6 \cdot 10^3$ км³. Считается, что эта вода атмосферного происхождения, связанного с влиянием системы реки Колорадо.

Однако простое наличие массы воды под землей является недостаточным условием для успешной разработки геотермальных ресурсов. Эта масса воды должна быть нагрета, по крайней мере в некоторых местах. Университет шт. Калифорния (Риверсайд) и Управление мелиорации осуществляют программы, направленные на определение тепловых аномалий, т.е. тех участков, где тепловой поток из внутренних областей земли существенно превышает нормальный. Для проведения этих исследований используются современные геофизические методы разведки.

Для получения карт тепловых аномалий использовались измерения силы тяжести, удельного сопротивления пород, а также бурение неглубоких разведочных скважин. Состояние этих исследований в настоящее время описано в работе [9]. Были выполнены геофизические съемки района Импириал-Валли, а также проводились измерения и оценка тепловых потоков в форме градиентов температуры.

Для определения полного потенциала геотермальных ресурсов Рекс использовал достаточно простую методику. Он предположил, что любая область, характеризующаяся градиентом температур, превышающим $3 - 4^\circ\text{C}$ на каждые 30 м глубины, представляет собой область с полезным экономическим потенциалом. Это значение было выбрано из тех соображений, что для экономически оправданной эксплуатации вода с температурой $\sim 315^\circ\text{C}$ или выше должна находиться на глубинах, не превышающих 2400 м, что представляет собой предел, для промышленной их эксплуатации в геотермальных полях Батс и Серро-Прието.

Согласно результатам измерений, площадь районов с аномально высоким тепловым потоком, возможно, превышает 400 км². Расчеты Рекса делались в предположении, что на каждую продуктивную скважину требуется площадь 0,120 км². Это не совпадает с практикой работ в Мексике, где при групповом размещении скважин расстояние между ними значительно меньше. Если предположить, что каждая скважина производит количество пара, достаточное для выработки 10 МВт электрической мощности, то можно прийти к выводу, что

потенциал области Импириал-Валли составляет $\sim 30\,000$ МВт. Для выработки электрической мощности 10 МВт требуется расход пара из скважины ~ 91 т/ч, превышающий расход пара скважин в Мексике, диаметр ствола которых несколько меньше предполагаемого диаметра подобных скважин в США. Проницаемость формации, однако, может оказаться ограниченной, а сделанные оценки — слишком завышенными.

РАЙОН ОЗЕРА МОНО-ЛЕЙК

Проявления геотермальной активности отмечались также в области озера Моно-Лейк — Лонг-Валли — Каса-Дьябло в районах Восточной Сьерры-Невада, шт. Калифорния. Пробуренные на участке Каса-Дьябло неглубокие скважины вскрыли бассейн горячей воды. Промышленной эксплуатации эти скважины не подвергались. В районе озера Моно-Лейк была пробурена одна глубокая скважина фирмой "Эдисон" и связанными с ней фирмами. Скважина, пробуренная в сентябре 1971 г., оказалась сухой и холодной. В ближайшем будущем здесь предполагается пробурить дополнительные скважины. Потенциал этой области в настоящее время не может быть оценен.

Методы эксплуатации

Выбор средств, с помощью которых производится эксплуатация геотермальных ресурсов, зависит в первую очередь от природы последних, т.е. от того, является ли теплоноситель сухим паром или смесью пара и воды. Аналогичным образом, относительное значение, придаваемое выработке электроэнергии или получению пресной воды, будет определять, какой из этих продуктов будет считаться важнейшим и какие методы будут использованы для его производства. Поскольку все рассматриваемые процессы являются термодинамическими по своей природе, то требуется использование охлаждения какого-либо типа. Выбор способа охлаждения будет зависеть от требуемых продуктов и от имеющихся в наличии охлаждающих сред, таких, как местная вода. Данный раздел посвящен описанию оборудования, которое необходимо и доступно для использования в геотермальных процессах.

СУХОЙ ПАР

Сухой пар можно использовать как для выработки электроэнергии, так и в качестве источника тепла в опреснительной установке. Опреснительная установка может работать как на местной, так и

морской воде. Известные ресурсы сухого пара в Калифорнии, однако, находятся в тех районах, которые не испытывают недостатка в воде. Поэтому использование геотермального сухого пара для производства пресной воды не рассматривается как заслуживающее внимания, хотя технология этого процесса довольно проста.

В этом случае обычные опреснительные установки, спроектированные в расчете на использование имеющейся в наличии питательной воды, будут вместо пара, производимого другим источником (например, бойлерной установкой, работающей на нефти, или отработанного пара низкого давления с электростанции), потреблять просто геотермальный пар.

Способ использования сухого геотермального пара для производства электроэнергии также прост. На выходе из скважины получают пар более низкого давления по сравнению с используемым на обычных или атомных электростанциях. Этот пар, по-видимому, не требует специальной обработки, за исключением отделения твердых частиц, способных вызвать износ лопаток турбины. С этой целью обычно используют простой сборник частиц.

Вследствие низкого давления питательного пара турбины, работающие на геотермальном паре, отличаются по конструкции от турбин обычных современных электростанций. Для обеспечения заданной мощности на выходе дроссельные клапаны, например, имеют большие размеры, чем на обычных станциях. В турбине отсутствуют ступени высокого давления. При одинаковых мощностях на выходе турбины, работающие на геотермальном паре, существенно больше по размерам турбин, предназначенных для работы на паре высокого давления, однако общий вид геотермальной турбины напоминает ступени низкого давления обычной турбины. Наиболее крупными агрегатами турбин являются ступени низкого давления и выхлопной паропровод. Из-за низкого давления геотермального пара требуется значительно больший его расход по сравнению с расходом в обычной турбине для получения одинаковой электрической мощности.

Следовательно, для обеспечения заданной мощности последние ступени турбины могут быть существенно больше соответствующих ступеней обычной турбины. На их размеры также влияет конструкция узла противодействия турбины. Следовательно, нельзя ожидать, что максимальная выходная мощность геотермальных турбин будет близка к максимальной мощности обычных турбин. В то время как наиболее крупные современные паровые турбины имеют мощность ~ 1000 МВт в одном блоке, мощность наиболее крупных геотермальных турбин

в настоящее время составляет всего лишь 55 МВт в одном блоке. Пар, расширяясь в турбине приводит в движение обычный электрогенератор. Рассмотрим некоторые способы удаления пара, прошедшего через турбину. Наиболее простым из них является просто выпуск пара в атмосферу при атмосферном давлении. Однако на обычных или атомных электростанциях пар из турбины направляется в конденсатор при давлении, намного меньшем атмосферного. Хотя конденсаторы дороги, но экономический анализ эффективности работы электростанции свидетельствует о том, что все же выгоднее использовать конденсатор, чем просто сбрасывать пар в атмосферу.

Эти же выводы справедливы и для геотермальных электростанций. Следовательно, пар после турбины должен направляться в конденсатор. Конденсатор представляет собой просто теплообменник, в котором пар конденсируется в воду; вода затем может быть перекачана под атмосферным давлением и сброшена, или, как это делается на обычных станциях, возвращена в котел. В процессе конденсации пара выделяется большое количество тепла. Это тепло должно быть выделено в атмосферу или передано какой-либо охлаждающей среде. Во многих случаях для отбора тепла используется океанская, озерная или речная вода, пропускаемая через конденсатор. В других случаях используется схема циркуляции охлаждающей воды, которая из конденсатора поступает в градирню, где производится отвод тепла в атмосферу.

Вопросы охлаждения применительно к ГеоТЭС и водяному циклу будут рассмотрены в конце этого раздела. Таким образом, из сказанного следует, что производство электроэнергии из сухого геотермального пара является непосредственно инженерной задачей, которая успешно решена, например, на станции "Большие Гейзеры" в северной Калифорнии и в ряде других мест в мире.

ВЫРАБОТКА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА БАЗЕ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ ВОД

В том случае, когда геотермальный источник представляет собой подземный бассейн с водой, находящейся под высоким давлением и при высокой температуре, то при понижении давления в стволе скважины происходит вскипание части жидкости и превращение ее в пар; движение этой смеси в стволе скважины подобно движению пароводяной смеси в перколяторе. Из скважины будет выходить пароводяная смесь, которую затем можно отсепарировать на пар и воду.

Этот процесс сепарации будет происходить при несколько повышенном давлении.

Полученный таким образом пар можно транспортировать по паропроводам к электростанции, на которой установлено обычное паросиловое оборудование. В этом случае снова давление пара ниже, чем на атомных или обычных электростанциях. Геотермальный пар расширяется затем в турбине и поступает в конденсатор.

Вода, отсепарированная от пара, может вскипеть при более низком давлении, образуя некоторое дополнительное количество пара при давлении, промежуточном между давлением в процессе первой сепарации и давлением в конденсаторе. Этот пар можно направить в ступень низкого давления турбины, увеличив, таким образом, полную выходную мощность последней. Остаток геотермальной воды может быть затем использован для получения пресной воды, нагревания, производства химических продуктов или просто сброшен.

ОПРЕСНЕНИЕ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ВОДЫ

Воды из геотермальных скважин могут быть использованы для получения пресной воды. (Конечно, если геотермальные воды сами по себе пресные, то никакой дальнейшей обработки не требуется. Но этот случай не характерен для скважин в Калифорнии.) Для дальнейшего обсуждения предположим, что из скважины поступает пароводяная смесь, которая в дальнейшем разделяется на пар и воду.

В наиболее часто рассматриваемом случае получаемый из скважины пар используется для выработки электроэнергии. Оставшаяся вода направляется в опреснительную установку. Опреснение достигается одним из способов, таких, как обратный осмос, дистилляция и другие. Процессы, подобные обратному осмосу, не требуют источника тепла и поэтому в этом случае тепло геотермальных вод практически не используется. Обычно для опреснения геотермальной воды используется один из процессов дистилляции (перегонки).

Процессы дистилляции заключаются в испарении части питательной воды и последующей конденсации паров, что позволяет получить чистую дистиллированную воду. Остаток питательной воды либо в дальнейшем снова испаряется и дистиллируется, либо сбрасывается. Такой процесс обычно используется при опреснении морской воды.

При использовании геотермальной воды питательная вода оказывается уже нагретой. Одну из главных статей расходов обычной опреснительной установки представляет собой расход на нагревание

воды. Поскольку это тепло является дорогим, то на обычных установках принимаются меры для максимального использования тепла. Вода в установке нагревается, а затем по мере испарения и охлаждения она проходит через последующие секции испарителя. Хладагент, используемый для конденсации паров, является фактически питательной водой при более низкой температуре. Таким образом, тепло, отведенное от одной секции дистилляционной установки, используется для нагревания другой секции.

При использовании геотермальной воды не требуется такой регенерации, и это приводит к упрощению конструкции установки. В обычной практике опреснения особое внимание уделяется выбору правильного соотношения между затратами на используемую энергию и капитальными затратами на оборудование. Вследствие более высоких капитальных затрат, требуемых для достижения большей эффективности работы установки, указанные выше два фактора комбинируются таким образом, чтобы получить оптимальные рабочие характеристики и конструкцию. Те же факторы действуют и в случае использования геотермальной воды. Стоимость получения геотермальной воды с сопутствующим теплом должна быть сбалансирована с большими капитальными затратами для более эффективного использования геотермальной энергии. Ожидается, однако, что в данном случае указанный выше оптимум будет иметь место для установок с меньшей эффективностью, хотя эти оптимальные условия еще должны быть четко определены.

В последних секциях геотермальной дистилляционной установки некоторое количество тепла должно быть отведено либо в атмосферу, либо передано какой-либо охлаждающей среде. После извлечения большей части воды из первоначального геотермального раствора, оставшийся рассол представляет собой сильно концентрированную жидкость и удаляется из установки. Этот остаточный рассол называется сбросом. Таким образом, на геотермальной электростанции геотермальный пар превращается в конденсат, отведенное тепло и электроэнергию. В опреснительной установке геотермальные воды превращаются в пресную воду, сбрасываемый рассол и отведенное тепло.

Пар, отделенный от пароводяной смеси на выходе из геотермальной скважины, может быть также использован в качестве источника тепла в опреснительной установке, работающей не на геотермальной воде, а на местных минерализованных водах. Таким образом, может оказаться возможным использование отсепарированной геотермальной

термальной воды в одной опреснительной установке и геотермального пара в другой установке для опреснения местных минерализованных вод.

СХЕМА ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ С ЗАМКНУТЫМ ЦИКЛОМ

Уже указывалось, что при прохождении по стволу скважины геотермальная вода, вскипая, превращается в смесь пара и воды. При этом геотермальная вода теряет значительную часть своей энергии.

Существует и другой метод использования термальной энергии. Он заключается в поддержании высокого давления воды в скважине и извлечении воды из скважины при высокой температуре. При этом требуется устанавливать насосы в самой скважине. Следует учесть, что для работы насосов потребуются значительная мощность, и поэтому необходимо тщательно проанализировать, что эффективнее — использование электрической мощности таким способом или ухудшение эффективности термодинамического цикла при извлечении пароводяной смеси из скважины.

Горячая вода при использовании рассматриваемого метода выходит из скважины под высоким давлением и направляется в теплообменник. Здесь она отдает часть своего тепла другой рабочей жидкости, которой могут быть вода или другие вещества. В частности, предлагается использовать для этой цели изобутан или другие органические вещества, обычно используемые в качестве охладителей.

Затем охлажденная геотермальная вода возвращается в недра путем закачки ее в скважины или сбрасывается. Теплообменник выполняет роль бойлера для рабочей жидкости, которая испаряется и направляется в турбину для выработки электроэнергии. Из турбины пар поступает в конденсатор, откуда образующаяся жидкость перекачивается под высоким давлением на вход теплообменника и снова проходит через последний. Этот цикл в точности воспроизводит аналогичные циклы на обычных тепловой или атомной электростанциях. Конденсатор, конечно, должен охлаждаться атмосферным воздухом или из источника внешней воды.

Одна из причин использования такого цикла обусловлена стремлением избежать отложений карбонатов, образующихся при вскипании некоторых геотермальных вод. Этот цикл не исключает образования отложений, когда насыщенные растворы таких веществ, как кремнезем (который выделяется из раствора при охлаждении), охлаждаются в теплообменнике. Для данной конструкции намеренно не рассматри-

ваются вопросы, связанные с подачей геотермальной воды. В большинстве мест потребуется установка глубинных насосов в скважинах. В настоящее время не существует насосов с электрическим приводом, которые могли бы работать в условиях отбора воды с глубин, превышающих 300 м. На небольших глубинах в наиболее известных геотермальных районах вряд ли удастся обнаружить воды с достаточно высокой температурой.

Может оказаться, что в некоторых областях геотермальные воды будут подниматься естественным путем с больших глубин и в этом случае они могут быть откачаны, в то время как в скважине будет поддерживаться давление, достаточное для предотвращения вскипания жидкости. Фирма "Магма пауэр" активно исследует технологию этого метода. В то время как подобная система обладает рядом потенциальных преимуществ, ее разработка находится еще в ранней стадии, и поэтому пока невозможно сделать какие-либо определенные оценки относительно ее стоимости и рабочих характеристик [10].

ОХЛАЖДЕНИЕ

При обсуждении каждого из предложенных методов выработки энергии или получения пресной воды необходимым условием являлось охлаждение установки. Это основное требование замкнутых термодинамических циклов и удовлетворяется оно различными путями. В общем случае применяется один из трех способов охлаждения.

В первом из них в качестве охладителя используется атмосферный воздух. Такие установки называются градирнями для сухого охлаждения. В этом случае не происходит испарения воды в воздух и рабочая характеристика охладителя является функцией температуры воздуха, которая обычно измеряется.

Можно также отводить тепло в атмосферу, используя градирни для мокрого охлаждения. В такой градирне обеспечивается проток атмосферного воздуха через решетчатый ороситель, по которому стекают капельки жидкости. Жидкость при этом охлаждается непосредственно потоком воздуха, а также за счет испарения в воздух. Такие градирни характеризуются очень большим расходом воды, но, с другой стороны, они более эффективны, чем градирни для сухого охлаждения как по стоимости, так и по охлаждающей способности.

Оба класса градирен можно разделить на два типа. К первому относятся градирни с принудительной подачей воздуха, в которых используются большие вентиляторы для создания искусственного потока

атмосферного воздуха через градирню. В другом типе градирен с естественной тягой путем нагревания столба воздуха обеспечивается перемещение воздуха за счет естественной конвекции, подобно тому, как горячий воздух выходит в дымовую трубу. На ГеоТЭС в Долине Больших Гейзеров используются градирни с дутьем.

Еще один метод охлаждения заключается в использовании воды из внешнего источника, такой, как океанская, речная, озерная вода или вода из бассейна для охлаждения, и пропускании этой холодной воды непосредственно через конденсатор и затем сбрасывании нагретой воды в источник, откуда она извлекается. Этот метод является наименее дорогим и наиболее эффективным из всех методов охлаждения. Однако не всегда имеется возможность использовать его либо вследствие нехватки воды для таких целей, либо вследствие того, что сброс нагретой воды в озеро или реку может оказать неблагоприятное воздействие на окружающую среду.

Общий анализ системы и стоимость выработки электроэнергии с использованием сухого пара

Характеристики системы, работающей на сухом паре, относительно хорошо изучены на основе опыта, приобретенного во время эксплуатации электростанции "Большие Гейзеры". В Калифорнии неизвестны другие месторождения сухого пара. В Долине Больших Гейзеров использованы обычные методы бурения, применяемые при разведке нефтяных месторождений. В зонах выхода пара, однако, вместо бурового раствора используется сжатый воздух. После прохождения через фильтры, служащие для удаления твердых частиц из потока пара, последний направляется по теплоизолированным паропроводам на электростанцию. Производительность скважин обычно различна, но производительность последних наиболее глубоких скважин обеспечивает в среднем выработку 8 МВт электрической мощности на скважину, а по сообщениям одна из последних скважин обеспечивает выработку 20 МВт электрической мощности.

Фирма "Пэсифик гэз энд электрик" покупает пар у производителей на электростанции. Для привода электрогенераторов используются обычные конденсационные паровые турбины. Конструкции этих турбин приспособлены для работы с геотермальным паром относительно низкой температуры и давления. Например, в блоке № 5 на электростанции "Большие Гейзеры" используется пар с давлением

0,69 МПа и температурой 180°С. Можно сравнить эти цифры с показателями, характерными для обычной тепловой электростанции "Мосс Лэндинг", принадлежащей той же фирме, на которой используется пар с давлением 25,3 МПа и температурой 538°С. С понижением температуры и давления пара падает к.п.д. станции, так что геотермальные установки потребляют пара в 2 – 3 раза больше, чем обычные паросиловые установки.

После расширения в турбине пар конденсируется в смешивающем конденсаторе. Здесь охлаждающая вода смешивается с паром, вызывая конденсацию последнего. Рабочая жидкость, охладитель и конденсат затем откачиваются из конденсатора, работающего в разреженных условиях (~0,013 МПа), в вентиляционную градирню.

Большая часть сконденсированной из пара воды испаряется в градирне. Однако часть ее, составляющая в среднем 20% (точное количество зависит от погоды), не испаряется и составляет сброс градирни. Эта вода содержит следы бора и аммиака и не годится для слива в местные водоемы. Поэтому она возвращается производителем пара, которые закачивают ее в скважины.

Установленные на геотермальной станции "Большие Гейзеры" генераторы приобретены у японской фирмы "Тошиба", которая поставила также оборудование для установки в Серро-Прието. Мощность каждого из этих генераторов составляет 55 МВт. Размеры их ограничены как трудностями транспортировки на место установки, так и экономически оправданной длиной паропроводов между скважинами и электростанцией. Силовые блоки электростанции "Большие Гейзеры" размещены по всей продуктивной площади.

Много интересной и полезной информации, касающейся финансовых аспектов и режимов работы электростанции "Большие Гейзеры" содержится в заявлении фирмы "Пэсифик гэз энд электрик" от ноября 1970 г. "Об общественной пользе и необходимости строительства блоков № 9 и 10 на геотермальной электростанции" комиссии, ведающей общественными предприятиями шт. Калифорния. Например, показано, что для этого геотермального поля в условиях, когда накоплен некоторый опыт эксплуатации с момента одобрения проекта и приобретения оборудования до промышленного использования, требуется всего лишь 28 месяцев. Приведенные ниже данные о расходах иллюстрируют некоторые важные моменты строительства геотермальной электростанции.

	Расходы, тыс. долл.
Земля и права на землю	—
Здания и сооружения и их усовершенствования	1 997
Оборудование бойлерной установки ¹⁾	456
Турбогенераторный блок	6 191
Вспомогательное электрическое оборудование	1 000
Разнообразное энергетическое оборудование	130
Аппаратура связи	6
Техническое обеспечение, управление	716
Строительная площадка, складские помещения	81
Накладные расходы на строительство	1 771
Всего	12 347

В эту таблицу не включены затраты на строительство подстанций, линий передачи, а также стоимость производства и транспортировки пара. Таким образом, стоимость 1 кВт мощности, составляющая 100 долл., относится только к самой электростанции.

В указанном выше документе фирмы "Пэсифик гэз энд электрик" оценивается полная стоимость выработанной электроэнергии. Постоянные затраты включают прибыль на инвестированный капитал и амортизационные отчисления, налоги и эксплуатационные расходы и достигают 2025 тыс. долл. в год для двух блоков.

При коэффициенте использования мощности 80%, являющемся вполне допустимым значением, если учесть опыт работы геотермальной станции "Большие Гейзеры", и стоимости пара 2,1 цент./кВт·ч (плюс 0,5 цент. за сброс конденсата) полная стоимость 1 кВт·ч выработанной электроэнергии составляет 5,33 цент. В работе [1] отмечается, что в 1968 г. средняя стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, произведенной на геотермальной станции в Калифорнии, составляла ~ 7 цент.

Таким образом, капиталовложения на 1 МВт мощности на ГеоТЭС "Большие Гейзеры" существенно меньше, чем для современной тепловой электростанции (затраты на которую возрастают частично вследствие установки оборудования для контроля за загрязнением окружающей среды), а эксплуатационные расходы и стоимость топлива (пара) составляют ~85% от соответствующих значений для

¹⁾ Приведенная цифра относится к парораспределительному оборудованию, стоимость бойлера сюда не включена.

современной тепловой станции. Таким образом, судя по этой умеренной оценке можно сказать, что электроэнергия, выработанная на ГеоТЭС "Большие Гейзеры", оказывается несколько дешевле электроэнергии, выработанной на тепловых электростанциях, и производство электроэнергии осуществляется без существенного ущерба для окружающей среды, за исключением, возможно, местности, на которой расположена станция.

При строительстве новых атомных станций затраты на 1 кВт установленной мощности превышают 300 долл., стоимость производства 1 кВт · ч, при использовании ядерного топливного цикла, составляет более 2 цент/кВт · ч. Таким образом, для условий Долины Больших Гейзеров затраты на 1 кВт мощности, вырабатываемый на ГеоТЭС, оказываются также меньшими, чем при производстве энергии на атомной электростанции.

ВОДЫ ДЛЯ ЗАКАЧКИ В НЕДРА

Общий анализ системы и затраты на выработку энергии и производство воды в системе с испарителями, ожидаемые в долине Импириал-Валли даны в работе [1].

Вследствие извлечения геотермальной воды, идущей на выработку электроэнергии или производство пресной воды, в некоторых районах серьезной проблемой может стать оседание земли. Из-за конфигурации водораспределительной и дренажной систем в долине Импириал-Валли оседание земли может оказаться особенно серьезной проблемой именно для этого района. Возможным средством предотвращения оседания является закачка воды в недра в продуктивных зонах или вблизи них, производимая таким образом, чтобы этот процесс не оказывал неблагоприятного воздействия на работу скважин. Недостаточное знание условий залегания подземных вод не позволяет сделать определенные выводы о необходимости или целесообразности закачки.

Если, однако, появляется необходимость в такой операции, то встает вопрос об источнике инжестируемой воды. Поскольку вполне возможно, что оседание земли может произойти в районе Импириал-Валли (здесь наблюдается непрерывное естественное оседание со скоростью ~1 см/год вследствие тектонической активности), и поскольку оно может произойти на орошаемых участках долины, там, где особенно пагубными могут стать его последствия, то дальнейшее обсуждение будет касаться именно этой области. Во многих, если не в большинстве, других геотермальных областях, оседание земли не будет вызывать таких неприятных последствий.

Наиболее вероятным источником воды для закачки будут, конечно, воды, остающиеся после геотермального процесса производства энергии или пресной воды. Вода из продуктивных геотермальных скважин на выходе из опреснительной установки или градирни должна каким-то образом удаляться, и закачка ее в недра кажется наиболее эффективным способом ее удаления. Однако поскольку часть первоначальной воды расходуется (в виде пара, дистиллятной воды или за счет испарения), то этот дефицит должен быть восполнен водой из внешнего источника.

В некоторых районах долины Импириал-Валли имеются сбросные воды после орошения. При использовании таких вод для инъекции требуется их предварительная обработка для удаления из них органических веществ. Кроме того, встает вопрос транспортировки таких вод. В долине имеется сложная сеть водораспределительных и дренажных каналов. Перемещать воду поперек этой системы будет трудно и дорого. Кроме того, эти воды поддерживают уровень в озере Солтон-Си, которое является важным объектом для отдыха. По этим причинам в настоящее время невозможно дать оценки затрат при использовании сбросных вод.

Имеются также источники неглубоко расположенных грунтовых вод. Из посторонних источников в геотермальном цикле может быть использована только вода солоноватых источников, но величина и местонахождение последних достоверно не установлены. Обоснованные оценки затрат пока невозможны, но стоимость 1 м³ инжестируемой воды может быть добавлена непосредственно к стоимости 1 м³ дистиллятной и охлаждающей воды, извлеченных из геотермального пара. Таким образом, если стоимость воды из постороннего источника составляет 8 долл. за 10³ м³, то стоимость дистиллятной воды возрастает на 8 долл. за 10³ м³, поскольку их соотношение приблизительно равно 1:1. Эта стоимость должна быть добавлена к эквивалентной стоимости произведенной электроэнергии, если за счет воды из внешних источников пополняется дефицит охлаждающей воды при испарении.

Единственным известным надежным источником воды для закачки является океан. К счастью, Калифорнийский залив отделен от долины Импириал-Валли менее чем сотней миль, и максимальный подъем между ними едва превышает ~10 м. Это не означает, конечно, что доставка океанской воды обойдется дешево или даже окажется возможной. Залив расположен в пределах территории Мексики. Эта страна должна дать разрешение на отбор воды из залива и на право

транспортировки ее по своей территории.

Если даже такое разрешение будет получено, проблема не станет тривиальной. Транспортировка воды через орошаемые области Мексиканской долины может нарушить нормальное функционирование существующих там систем орошения. Кроме того, обширные солончаки на оконечности залива и большой размах приливов могут вызвать серьезные затруднения при создании системы водозабора. Пока еще не имеется никакого плана создания такой системы транспортировки океанской воды.

Однако в работе [12] приведены оценки стоимости системы трубопровод — канал для транспортировки воды в противоположном направлении от озера Солтон-Си к Калифорнийскому заливу. Стоимость системы для транспортировки $120 \cdot 10^6 \text{ м}^3$ воды в год по оценкам составляет ~ 30 млн. долл., а для транспортировки $600 \cdot 10^6 \text{ м}^3$ воды в год потребуется ~ 60 млн. долл. Даже при больших расходах воды капитальные затраты достигают более 1 долл. на 100 м^3 , а эксплуатационные расходы еще более увеличат эту цифру. Вероятно, потребуется предварительная обработка воды перед поступлением ее в канал, чтобы не допустить загрязнения последнего, а также может потребоваться более тщательная обработка воды перед ее закачиванием. Затраты на все эти операции в настоящий момент неизвестны. Маловероятно, однако, что стоимость морской воды будет ниже 17 долл. за 10^3 м^3 , да и эта цифра, возможно, слишком занижена.

Рекс и другие авторы предложили регулировать соленость озера Солтон-Си путем ежегодного отвода части воды из озера. Это количество воды в настоящее время оценивается величиной $168 \cdot 10^6 \text{ м}^3$. Его будет достаточно после того, как возможное увеличение солености будет поставлено под контроль; первоначально необходимо отвести больший объем воды из озера. В стационарной фазе, однако, указанная выше величина отбора воды достаточна для поддержания солености на приемлемом уровне, а уровень воды в озере будет при этом на $\sim 1,5 \text{ м}$ ниже, чем в настоящее время.

Указанного количества воды достаточно для компенсации убыли конденсата на геотермальной станции мощностью 2000 МВт. Хотя высказанное выше предположение является полезной идеей, оно не решает проблемы начального периода регулирования озера Солтон-Си, так же как не снимает этого вопроса и в отношении других предлагаемых разработок. Если, однако, закачка воды поднадобится только в отдельных районах долины Импириал-Валли, может возникнуть

необходимость претворения этой идеи в жизнь. Стоимость предварительной обработки соленой, богатой органическими веществами воды, необходимой, чтобы избежать зарастания скважин, может быть довольно высокой. Однако эти затраты плюс затраты на транспортировку и закачку могут быть разделены между потребителями электроэнергии и теми, кто пользуется различными благами района Солтон-Си. До детального исследования различных возможных ситуаций, все описанные выше идеи получения негеотермальной воды для инъекции остаются в высшей степени умозрительными.

Влияние на окружающую среду ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЗЕМЛИ

Работа геотермальных станций или опреснительных установок так или иначе, связана с воздействием на окружающую среду. Наиболее очевидным проявлением такого воздействия является внедрение промышленных объектов в неиндустриальные районы. К примеру, геотермальная скважина бурится таким же образом, как и нефтяная. Место, где производятся работы, обрастает буровыми вышками, и естественно возникают проблемы, связанные с шумом. Однажды пробуренная и введенная в эксплуатацию геотермальная скважина может быть безвредной для окружающей среды. Однако продукция скважины должна быть собрана в трубопровод и транспортирована по нему на геотермальную установку, часто удаленную на расстояние до миль от скважины.

Эти теплоизолированные трубопроводы дорого прокладывать под землей и поэтому их прокладывают по поверхности земли. Такие трубопроводы могут оказывать определенное воздействие на окружающую местность. Геотермальные электростанции и опреснительные установки являются типичными промышленными объектами с большими башнями-градирнями и характеризуются довольно заметным уровнем шума. Таким образом, эксплуатация геотермального месторождения оказывается в общем не вполне совместимой с существованием рядом жилых районов или с использованием территории в различных коммерческих целях.

СБРОСНЫЕ ВОДЫ

При эксплуатации геотермальных установок возможны более общие и разрушительные воздействия на окружающую среду, которые, к счастью, можно контролировать. При разработке геотермаль-

ного месторождения, дающего пароводяную смесь, возникает проблема размещения избыточных вод. В некоторых случаях эти воды характеризуются высокой минерализацией и не могут быть сброшены в поверхностные воды. Если не обеспечить достаточно хорошее перемешивание, то даже сброс в океан может привести к отрицательным локальным эффектам, если сбрасываемые после геотермальной установки воды существенно отличаются по своему составу от океанской воды.

Рассмотрим масштаб проблемы. Предполагается, что конденсат из установок, представляющий собой дистиллятную воду, полностью или частично используется для потребительских целей. Даже в этом случае, как, например, в Долине Больших Гейзеров, где конденсат используется для восполнения потерь охлаждающей воды в градирнях, избыточная вода содержит следы химических веществ, что препятствует ее сбросу в местные воды. Такая вода часто требует дальнейшей обработки, или, как это делается на станции "Большие Гейзеры", она снова закачивается с помощью глубоких скважин в землю. Здесь таким образом закачивается около 20% конденсата. Для геотермальной станции мощностью 100 МВт это составляет свыше 3,8 тыс. м³ в сутки. Одна большая скважина может поглотить весь этот поток воды.

Более серьезная проблема возникает в том случае, когда продуктом геотермальных скважин является не сухой пар, а горячая вода. В этом случае вода может быть сильно минерализованной. Например, на геотермальном поле Батс вблизи озера Солтон-Си вода характеризуется исключительно высоким содержанием солей (> 20%). В Серро-Прието (Мексика) вода содержит ~ 2% солей (содержание солей в океанской воде составляет 3,3%). Согласно проведенным расчетам, для условий, подобных имеющим место в области Серро-Прието, на ГеоТЭС с эквивалентной электрической мощностью 1000 МВт количество производимой попутной соленой воды будет составлять приблизительно 570 тыс. м³ в сутки или свыше 185 млн. м³ в год. При выпаривании воды, содержащей 2% солей, будет образовываться ~ 12 тыс. т солей в сутки. Это составит весьма сложную задачу удаления этих солей в твердой фазе и представит реальную угрозу окружающей среде.

Перед сбросом концентрацию солей в воде можно повысить в испарительных бассейнах или же использовать минерализованную воду в качестве питательной воды на опреснительной установке. В любом случае существует предел для концентрации и, следовательно,

но, удаление таких растворов представляет собой проблему, требующую тщательного рассмотрения. В большинстве внутренних районов транспортировка таких рассолов в океан оказывается весьма трудным и дорогим делом и поэтому следует искать других методов их удаления.

Эта проблема специально исследовалась для района озера Солтон-Си [13]. Наиболее перспективным представляется метод удаления соленой воды в поглощающие скважины. Эти скважины бурятся на глубину, где расположены пористые формации, способные впитать воду. Чтобы исключить загрязнение грунтовых вод, скважины, возможно, придется бурить на глубину нескольких метров. Для предотвращения оседания почвы там, где это необходимо, воду можно, вероятно, закачивать в продуктивные пласты.

После преодоления первоначального гидростатического давления в скважине часто оказывается, что вода свободно вливается в нее, особенно если сбрасывается концентрированный и охлажденный раствор большей плотности. Этот метод широко используется для удаления растворов из нефтяных скважин и промышленных сбросов. Нужно особенно тщательно следить, чтобы сбрасываемые растворы не попали в водоносные пласты, связанные с районами, где такой сброс может вызывать вредные последствия, например с источниками сельскохозяйственной или питьевой воды. Эта проблема, вероятно, не возникает для геотермальных областей. Потенциально серьезной проблемой при закачке сбросов может быть осаждение минеральных веществ из воды в порах породы, окружающей скважину. Такое осаждение может вызвать быстрое нарушение приемистости скважины.

Маловероятно, чтобы отработанные геотермальные воды в Калифорнии могли быть удалены каким-либо другим путем, кроме закачки их в скважины. В Мексике в области Серро-Прието сбросные воды просто текут по каналам в сторону Калифорнийского залива через Рио-Гарди. Те потоки воды, которые в настоящее время там сбрасываются, уже оказывают влияние на систему Рио-Гарди и ожидается, что дальнейшее развитие геотермальных работ потребует прокладки специального сбросного канала к заливу. Такое решение вопроса, конечно, не подходит для долины Импириал-Валли, которая окружена со всех сторон сушей и имеет дренажные сбросы в озеро Солтон-Си. Региональное управление по контролю за качеством воды уже запретило спускать геотермальные воды в озеро Солтон-Си и его притоки. Эта мера была необходима в связи с уже намечавшейся угрозой неконтролируемого увеличения солености воды. Те же самые соображения, вероятно, будут справедливы и для области озера Моно-Лэйк.

ОСЕДАНИЕ ЗЕМЛИ

С обсуждаемыми выше вопросами тесно связана проблема оседания земли. Когда из подземного бассейна откачиваются большие объемы жидкости, может произойти оседание поверхности земли, иногда с довольно пагубными последствиями. Такой случай имел место на нефтяном месторождении Вилмингтон. Правда, это довольно необычный случай. Если водоносный горизонт состоит из трещиноватых пород, то оседание маловероятно. Оно становится возможным, если имеется очень пористая среда, которая может осесть при извлечении из нее воды. С этой неприятностью иногда удается справиться в практике эксплуатации нефтяных полей путем закачки воды в подземный бассейн.

Таким образом, удаление геотермальных сбросов путем закачки может оказаться также необходимым для предотвращения оседания земли. Последнее явление потенциально представляет серьезную угрозу, и чтобы предотвратить его, в таком засушливом сельскохозяйственном районе, каким является долина Импириал-Валли, возможно, придется доставлять воду для закачки со стороны. В этом районе уже запланирована сложная сеть наблюдательных точек, так чтобы оседание земли, которое может быть вызвано дальнейшими геотермальными разработками, было своевременно обнаружено. Случаи оседания земли уже наблюдались на геотермальных месторождениях в Уайракей в Новой Зеландии и в Серро-Прието, но в последнем случае оседание, возможно, и не связано с геотермальным производством.

СЕЙСМИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ

Опыты в Колорадо и некоторые из проводимых в настоящее время экспериментов показывают, что закачка воды глубоко под землю может стимулировать сейсмическую активность. Сейсмические проявления, связанные с извлечением воды из подземных бассейнов и закачкой ее под землю на геотермальных полях, могут быть специфическими для разных районов, и поэтому в настоящее время нельзя с определенностью утверждать, станет ли это проблемой. Сделано даже предположение, что индуцированная микросейсмичность ослабляет напряжения в зонах разломов и тем самым, возможно, предотвращает возникновение больших землетрясений.

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ВОЗДУХА

Побочными продуктами геотермальных скважин часто являются вредные газы. В Долине Больших Гейзеров, например, непрерывно стоит запах сероводорода (H_2S). Сероводород присутствует в паре вместе с другими газами, среди которых преобладает углекислый газ. Неконденсируемые газы составляют 0,2 – 1,8%. Из них на долю CO_2 приходится 82,5%, метана – 6,6%, водорода – 1,4%, инертных газов – 1,2%, H_2S – 4,5% и аммиака – 3,8%.

Присутствие этих газов в паре заставляет во избежание коррозии выбирать соответствующие материалы для изготовления элементов турбины, конденсатора и опреснительной установки. Так, конденсаторы фирмы "Пэсифик гэз энд электрик" должны быть облицованы нержавеющей сталью. Неконденсируемые газы следует извлекать из потока пара или воды, чтобы обеспечить нормальную работу конденсаторов. Это делается довольно просто, и на станции "Большие Гейзеры" выделяющийся газ выбрасывается в атмосферу. Некоторые газы растворяются в конденсате. Это относится к H_2S , часть которого растворяется в конденсате, а затем выделяется в атмосферу при испарении конденсата в градирне. Если предположить, что содержание неконденсируемого газа в потоке пара составляет в среднем 0,5%, то с учетом сказанного выше содержание H_2S в паре составляет $2,25 \cdot 10^{-2} \%$.

Для ГеоТЭС мощностью 1000 МВт требуется 195 тыс. т пара в сутки. Это означает, что за сутки будет выделяться в атмосферу 44 т сероводорода. Это приблизительно эквивалентно тому количеству серы, которое выбрасывается в атмосферу на тепловой электростанции той же мощности, использующей топливо с низким содержанием серы. В настоящее время разработана технология, не допускающая выброса этих газов в атмосферу. Фирмы "Пэсифик гэз энд электрик" и "Юнион ойл" в настоящее время заняты исследованием методов контроля за выбросом газов в атмосферу на станции "Большие Гейзеры". Вопрос упирается в стоимость и практическую реализуемость разрабатываемых методов. Таким образом, нельзя утверждать, что геотермальные установки по своей природе не приводят к загрязнению воздуха. Однако при использовании соответствующих средств контроля их работа действительно не вызывает загрязнения воздуха.

ОТВОД ТЕПЛА

Во время нормальной работы ГеоТЭС в окружающую среду происходит отвод тепла. Этот процесс имеет место во всех энергетических циклах с использованием тепловой энергии, причем чем ниже к.п.д. цикла, тем больше тепла должно быть отведено. Как уже отмечалось ранее, геотермальный пар используется при низких давлениях и температуре по сравнению с паром, используемым на обычных паросиловых или атомных станциях. Поэтому отвод тепла здесь должен быть большим. Это подтверждается данными по сравнительным расходам пара (которые в первом приближении соответствуют отводу тепла), приведенными в работе [14] для ГеоТЭС "Большие Гейзеры" и современной тепловой электростанции. Расходы пара для блоков № 3 и 4 станции "Большие Гейзеры" составляет 8,4 кг/кВт·ч, а для блоков № 6 и 7 станции "Мосс Лэндинг" — 3 кг/кВт·ч.

Рассмотрим вопрос об отводе тепла количественно. Согласно термодинамическим расчетам, при давлении на входе 690 кПа, использовании конденсатора с водяным охлаждением и градирни на ГеоТЭС мощностью 100 МВт будет отводиться 3630 МВт тепла (атомная электростанция такой же мощности выбрасывает в атмосферу ~2000 МВт тепла). Эти цифры сами по себе мало впечатляющи, если нет основы для сравнения. Имеются данные для среднего количества тепла, поступающего от Солнца в течение 24 ч летом в районе пустыни. Эта величина составляет 280 МВт/км². Следовательно, электростанция мощностью 1000 МВт отводит в окружающую атмосферу количество тепла эквивалентное тому теплу, которое получают от Солнца 13 км² пустыни. Если 10 таких электростанций, или эквивалентных им по мощности установок, будут размещены в долине Импириал-Валли, то полное количество отведенного ими тепла, отнесенного к площади района, равной 2600 км², составит 5% от полного количества тепла, получаемого от Солнца этим районом летом. Влияние такого отвода тепла на местный климат в настоящее время не выяснено.

При использовании охлаждаемых воздухом конденсаторов отвод тепла увеличится и будет приводить непосредственно к нагреванию атмосферы. Для решения вопроса о распределении нагретого воздуха и его влиянии на местный климат требуется подробное рассмотрение местных условий. При использовании градирен с водяным охлаждением температура воздуха будет подвержена меньшему воздействию, но большие количества испаряющейся воды будут влиять на влажность. При типичных рабочих характеристиках градирен на ГеоТЭС мощностью 1000 МВт будет испаряться до 60 млн. м³ воды в год. На

десяти таких ГеоТЭС испарится 600 млн. м³ воды в год. В настоящее время в долине Импириал-Валли ежегодно испаряется в атмосферу ~1,8 млрд. м³ воды за счет сельскохозяйственных земель и еще ~1,2 млрд. м³ испаряется с поверхности озера Солтон-Си. Следовательно, вода, испаряющаяся на ГеоТЭС, составит небольшую долю (20%) общего количества испаряющейся воды. В прошлые времена в долине Импириал-Валли использовалось больше воды, чем в настоящее время, и разница между нынешним и прошлым использованием воды примерно соответствует количеству воды, которое может испариться в градирнях.

Таким образом, не ожидается общего неблагоприятного воздействия ГеоТЭС на окружающую среду. Локальные же эффекты весьма возможны и заслуживают подробного исследования. Если рассматривать долину Импириал-Валли в целом, то следует отметить, что изменения теплового поглощения, связанные с состоянием местности (например, вспаханные поля, состояние листового покрова), преобладают над изменениями, которые будут связанными с отводом тепла на ГеоТЭС. Аналогично влажность в данном районе зависит главным образом от перемещения воздушных масс. Таким образом, наличие постоянных, распространяющихся на всю рассматриваемую область, воздействий маловероятно. Однако в непосредственной близости от ГеоТЭС возможно значительное их влияние на окружающую среду, и требуется проведение соответствующих исследований.

ВЫБРОСЫ ИЗ СКВАЖИН

При проведении любых буровых работ, когда ожидается выход жидкости под высоким давлением, необходимо учитывать возможность выброса из скважины. Выброс может осуществляться по-разному. Одним из его типов является классический выброс на нефтяной скважине. Такой выброс имел место во время бурения одной из ранних геотермальных скважин в области Серро-Прието. Чтобы остановить фонтанирование скважины, там были использованы стандартные методы, применяемые на нефтяных разработках. Потребовались дни, чтобы поставить скважину под контроль, и все это время из нее вырывались пар и соленая вода. При таком выбросе может выйти до 12 тыс. м³ соленой воды в сутки. Ясно, что выброс указанного количества соленой воды в сельскохозяйственном районе выдвигает серьезные проблемы. Должны быть разработаны методы быстрого прекращения фонтанирования скважины, как того требуют правила, регулирующие геотермальные разработки шт. Калифорния.

Другой тип выброса имел место в Долине Больших Гейзеров. Здесь скважина проходила через формацию с неустойчивыми породами. Попытки перекрыть поток пара привели к тому, что он стал уходить в землю, угрожая вырваться в любом месте. Таким образом, выброс продолжался, и не прекращались попытки установить контроль над действием скважины. Описанная ситуация подобна имеющей место на нефтяном месторождении Санта-Барбара-Чэнел, где при попытке установить контроль над нефтяной скважиной возникла опасность просачивания нефти из трещины в направлении морского дна. Такая возможность должна быть, конечно, исключена путем тщательного выбора типа ствола скважины. Правила бурения нефтяных скважин в шт. Калифорния обеспечивают, по-видимому, хорошую защиту окружающей среды в этом смысле.

Потенциальные ресурсы

Из нескольких геотермальных районов, выявленных в шт. Калифорния, только два привлекли широкое внимание исследователей: Долина Больших Гейзеров в северной Калифорнии и долина Импириал-Валли в южной Калифорнии. Рассмотрим возможный потенциал Долины Больших Гейзеров с точки зрения производства электроэнергии. Этой проблемой занимаются фирмы "Юнион ойл" и "Пэсифик гэз энд электрик". Последняя объявила о своих планах строительства геотермальных энергоблоков в данном районе в оставшиеся до конца этого десятилетия годы. Геотермальные энергоблоки вплоть до № 14 должны были быть пущены к осени 1975 г.; с введением в эксплуатацию этих блоков полная установленная мощность электростанции "Большие Гейзеры" достигнет ~600 МВт. К этому же сроку эта фирма намерена увеличить установленную мощность тепловых электростанций на 735 МВт, а атомных электростанций на 2120 МВт. За оставшиеся в этом десятилетии годы фирма планирует ввести в строй на атомных электростанциях дополнительно 4400 МВт установленной мощности. С учетом сказанного мощность геотермальных станций в 600 МВт хотя и заметна, но весьма мала.

Если, с другой стороны, геотермальное поле в Долине Больших Гейзеров окажется более обширным, чем по оценкам, сделанным на сегодняшний день (если, например, вполне реальной окажется оценка его эквивалентной электрической мощности в 4000 МВт), то вероятно, оно сможет заменить половину или более той мощности, которую фирма "Пэсифик гэз энд электрик" планирует ввести на своих атомных

электростанциях. Следует отметить, что до проведения значительно более обширной разведки с целью выявления областей, которые в настоящее время еще не являются экономически и технически привлекательными геотермальными полями (если таковые действительно существуют), геотермальные ресурсы не смогут реально заменить мощности, планируемые фирмой к вводу на атомных станциях.

Первая из вновь планируемых атомных станций должна вступить в строй весной 1977 г. С учетом сложившихся в данный момент темпов строительства, этот срок вряд ли будет выдержан. Если электрические нагрузки будут продолжать расти со скоростью, при которой требуется указанный выше ввод дополнительных мощностей на атомных станциях, то вполне возможно, что дальнейшая эксплуатация геотермальных ресурсов позволит заполнить образовавшийся разрыв в требуемых мощностях и преодолеть таким образом отставание в строительстве атомных электростанций.

Несколько факторов препятствуют более энергичной разработке геотермального поля Долины Больших Гейзеров. Во-первых, фирма-потребитель электроэнергии уже сделала значительные капиталовложения в развитие данного района, причем она обычно вкладывает капитал в строительство электростанций, срок эксплуатации которых можно точно предсказать заранее. Однако в случае геотермального месторождения, когда последнее становится непроизводительным, капиталовложения могут оказаться бесполезными; при этом невозможно точно определить заранее период экономически эффективной эксплуатации месторождения.

Во-вторых, если фирма "Пэсифик гэз энд электрик" будет иметь установленную мощность на станции "Большие Гейзеры", составляющую только 600 МВт, при общей установленной мощности системы, превышающей 15 тыс. МВт, то возможность потери производительности геотермального поля не окажет серьезного влияния на ее способность снабжать энергией своих потребителей. Рассмотрим проблему надежности, если мощность ГеоТЭС будет равна 4000 МВт. Можно утверждать, что продуктивность геотермального поля не будет резко падать, а будет постепенно убывать в течение нескольких лет. Это связано с определенными неудобствами, поскольку время введения в строй новых атомных электростанций составляет теперь примерно 10 лет. Таким образом, для надежной эксплуатации геотермальных ресурсов требуется наличие выявленных и подготовленных к разработке резервов. Этот факт подчеркивает необходимость энергичной разведки новых продуктивных площадей, наряду с эксплуатацией уже известных районов.

Таким образом, можно ожидать, что в настоящее время фирма-потребитель будет испытывать вполне естественное сомнение по поводу вложения слишком больших сумм на разработку геотермальных ресурсов и не будет слишком полагаться на освоение новых энергетических мощностей на основе таких, несколько неопределенных, ресурсов. Предполагаемый рост нагрузок в системе станций, принадлежащих фирме "Пэсифик гэз энд электрик", показывает, что даже с введением в строй двух дополнительных энергоблоков общей мощностью 2300 МВт на атомной электростанции в районе Дьябло-Каньон при современных темпах наращивания установленной мощности ГеоТЭС резервы системы не будут столь велики, как этого хотелось бы. Следовательно, с учетом реальных возможностей нельзя утверждать, что интенсивная разработка геотермальных ресурсов Долины Больших Гейзеров позволит фирме "Пэсифик гэз энд электрик" отсрочить установку следующих двух энергоблоков на атомной станции в районе Дьябло-Каньон хотя бы до конца этого десятилетия. ГеоТЭС скорее будут просто дополнением к общей установленной мощности энергетической системы фирмы и смогут позволить лишь несколько ослабить темпы ввода в строй атомных электростанций в будущем.

Если обратиться теперь к долине Импириал-Валли, то картина станет еще менее ясной. Здесь нет районов с экономически оправданной продуктивностью. Более того, пока не рассматривалось никакой интенсивной программы выявления и определения размеров таких районов, которая могла бы дать обнадеживающие результаты в ближайшие два года. Согласно наиболее оптимистическим из опубликованных оценкам, принадлежащим проф. Рексу, потенциальные возможности долины Импириал-Валли определяются в 20 тыс. МВт электрической мощности.

Прогнозы роста потребностей в электрической энергии в южной Калифорнии показывают, что приведенной выше мощности вполне достаточно для удовлетворения ожидаемых нужд в течение ближайших 10 – 20 лет. Однако при этом планируемое развитие обычных тепловых и атомных электростанций не может быть замедлено в настоящее время в ожидании создания геотермальных электростанций, поскольку в данный момент в южной Калифорнии не существует геотермальных полей с экономически выгодной производительностью. Ни один опытный проектировщик, планирующий производство электроэнергии, не может выработать общей стратегии развития энергетических мощностей, не зная коэффициента использования геотермальной мощности, а последний он не в состоянии оценить до осуществления

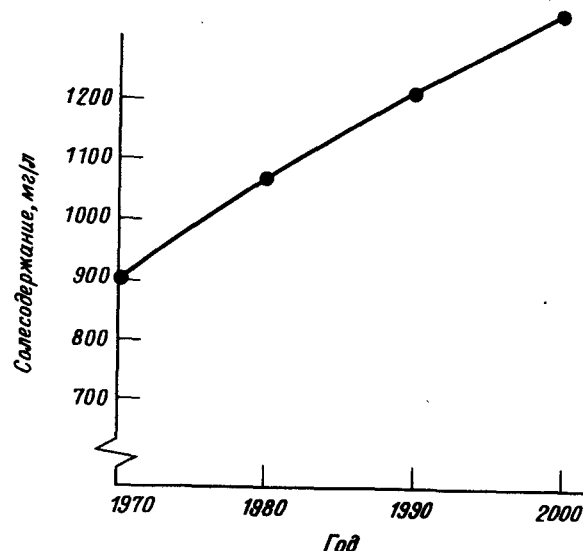
программы интенсивной разведки. В то же время еще не ясно, когда такая программа будет реализована и кем.

Даже если такая программа и окажется успешной, фирмы – потребители электроэнергии будут относиться к развитию геотермальных разработок с максимальной осторожностью из-за недостаточной надежности системы. Пока не будет надежно доказана экономическая выгода и определена продолжительность эксплуатации геотермальных полей, разработка геотермальных ресурсов должна проводиться без лишней поспешности.

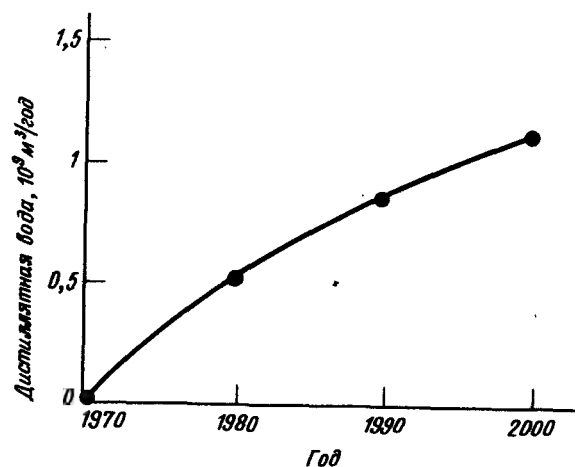
Интересно также рассмотреть, как потенциальное производство пресной воды на геотермальных установках может удовлетворить растущие потребности в воде долины Импириал-Валли. Известно, что система калифорнийских акведуков будет удовлетворять общие потребности южной Калифорнии в воде (исключая долину Импириал-Валли) в течение ближайших 20 лет, а возможно и дольше. Известно также, что качество воды из реки Колорадо, используемой на орошаемых землях этой долины, постоянно ухудшается. Несомненно, что это постоянное ухудшение качества воды неблагоприятно сказывается на сельском хозяйстве.

Например, в настоящее время вода, забираемая из реки Колорадо у дамбы Импириал-Дэм, содержит растворенные твердые вещества в количестве 900 мг/л. К 2000 г. по прогнозам Службы реки Колорадо содержание растворенных твердых веществ в воде превысит 1300 мг/л. Известно, что фермеры долины Мехикали-Валли, получающие воду из бассейна, образованного дамбой Морелос-Дэм, уже страдают от плохого качества этой воды, в которой концентрация растворенных веществ составляет 1200 мг/л. На фиг. 5.1 показано ожидаемое увеличение солености воды у дамбы Импириал-Дэм в зависимости от времени.

Предположим теперь, что обессоленная геотермальная вода будет использована для смешивания с используемой на орошение водой с целью поддержания общего количества растворенных в воде веществ на приемлемом для сельскохозяйственных целей уровне. Если предположить также, что таким приемлемым уровнем будет содержание, равное 900 мг/л, и что полное потребление воды орошаемыми районами долины Импириал-Валли остается на уровне $3,3 \cdot 10^9 \text{ м}^3$ ежегодно, то можно подсчитать количество полученной на опреснительных установках воды, требуемое для поддержания в этом районе благоприятного для сельского хозяйства солевого режима вод, в функции времени. Такой график приведен на фиг. 5.2. Из графика



Фиг. 5.1. Рост солености у плотины Импириал-Дэм согласно прогнозам Службы реки Колорадо (1971 г.).



Фиг. 5.2. Потребности в дистиллятной воде для смешения [1].

видно, что к 2000 г. для смешивания с орошаемой водой потребуется $1,1 \cdot 10^9 \text{ м}^3$ дистиллятной воды ежегодно. Следует отметить, что $\sim 7,4 \cdot 10^7 \text{ м}^3$ воды будет производиться ежегодно просто за счет сохранения конденсата, производимого на электростанции мощностью 1000 МВт. Таким образом, если электрическая мощность ГеоТЭС в долине Импириал-Валли действительно достигнет к 2000 г. 20 000 МВт, то производимого на этих станциях конденсата будет достаточно для смешения с идущей на орошение водой; чтобы поддержать требуемое качество воды, хотя при этом должна возрасти подача сбросных вод на охлаждение. В том случае, когда в одну схему с электростанцией включена опреснительная установка, использующая оставшийся после вскипания извлеченной из скважины воды раствор, то к уже упомянутой величине в $7,4 \cdot 10^7 \text{ м}^3$ воды будет добавляться, возможно, $17,8 \cdot 10^7 \text{ м}^3$ пресной воды в год при мощности геотермальной электростанции 1000 МВт. Следовательно, ежегодно потенциально возможно получить $\sim 3,6 \cdot 10^9 \text{ м}^3$ дополнительной воды.

Следует напомнить, что сама ГеоТЭС обеспечивает первичный прирост количества опресненной воды и при обеспеченности охлаждающей водой стоимость этой воды может оказаться достаточно низкой. Последующие же приросты количества воды должны обеспечиваться опреснительной установкой, предназначенной для производства воды, но эта вода уже, согласно сделанным здесь ранее оценкам, может оказаться достаточно дорогой.

В заключение отметим, что, согласно проведенным к настоящему времени геофизическим исследованиям, потребности южной Калифорнии в электроэнергии в ближайшие 10 – 20 лет могут быть удовлетворены за счет геотермальных ресурсов долины Импириал-Валли и что, если бы была предпринята разработка этих ресурсов, связанное с ней производство пресной воды могло бы оказаться способным поддержать на нужном уровне качество воды в орошаемых в настоящее время районах долины Импириал-Валли до конца века, а возможно, и в дальнейшем. Возможно также, что снабжение дополнительной водой окажется эквивалентным или даже превысит возможности системы Калифорнийских акведуков при создании системы транспортировки воды в страдающие от ее недостатка районы. Однако имеется явное несоответствие между потенциалом геотермальных ресурсов в долине Импириал-Валли и имеющимися в наличии общественными фондами, предназначенными для проведения геотермальных исследований в этом районе.

Литература

1. Geothermal Resources in California — Potentials and Problems, PB 212,753, May 1972.
2. Geothermal Hotline, July 1971.
3. Economic Potential of Geothermal Resources in California, Geothermal Resources Board of the State of California, January 1971.
4. Environmental Report — Unit 1 and 2, Mendocino Power Plant, Pacific Gas and Electric Company, September 1971.
5. Otte C., Drilling Production and Disposal Technology in the Salton Sea Geothermal Area Imperial County, Calif., Compendium of Papers, Geothermal Hearing, The Resources Agency, California, October 1970.
6. Diamond H.W., Testimony Before Geothermal Resources Board Compendium of Papers, Geothermal Hearing, The Resources Agency, California, October 1970.
7. Rex R.W., Phase 1 — The Imperial Valley Project, Institute of Geophysics and Planetary Physics, University of California, Riverside, October 1968.
8. Rex R.W., Investigation of Geothermal Resources in the Imperial Valley and Their Potential Value for Desalination of Water and Electricity Production, Univ. of California, Riverside, June 1970.
9. Geothermal Resource Investigations, Imperial Valley, California, Status Report, U.S. Bureau of Reclamation, April 1971.
10. Magma Max Power Generating Plant — Feasibility Study and Preliminary Cost Estimate, Rogers Engineering Co., Inc., San Francisco, September 1970.
11. McMillan D.A., Jr., Economics of The Geysers Geothermal Field, California, U.N. Symposium on Geothermal Resources, Pisa, Italy, September 1970.
12. Goldsmith M., Salinity Control Study, Salton Sea Project, Aerospace Corp., ATR-71 (S9990)-5, February 1971.
13. Geothermal Wastes and the Water Resources of the Salton Sea Area, California Dept. of Water Resources Bull., No. 143-7, February 1970.
14. Bruce A.W., Engineering Aspects of a Geothermal Power Plant, U.N. Symposium on Geothermal Resources, Pisa, Italy, September 1970.

6

СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ЭНЕРГИИ
ИЗ ГОРЯЧИХ
ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ РАСТВОРОВ

Метод полного потока

Ресурсы геотермальной энергии в Соединенных Штатах весьма велики. Геотермальная энергия заключена в относительно неглубоко залегающих месторождениях перегретого пара, горячих растворов и горячих сухих пород. В работе [1] предлагается способ производства электроэнергии путем преобразования энергии горячих геотермальных растворов, в частности растворов, содержащихся в геотермальных источниках вблизи озера Солтон-Си в Калифорнии. Результаты этой работы представлены в настоящем разделе.

В горячих растворах заключена преобладающая часть потенциально доступных ресурсов геотермальной энергии. Хотя месторождения перегретого пара, такие, как Долина Больших Гейзеров в Калифорнии, относятся к более предпочтительным источникам геотермальной энергии, чем месторождения горячих растворов, такие источники составляют по оценкам лишь одну двадцатую от их общего числа. С другой стороны, хотя огромное количество энергии заключено в горячих сухих породах, мощность, которую можно из них извлечь, ограничена низкой теплопроводностью пород, а технологии извлечения и преобразования энергии таких источников в настоящее время не существует.

Основу предлагаемого способа извлечения энергии из горячих растворов составляет метод полного потока. Согласно оценкам, этот метод экономически конкурентоспособен со всеми другими способами получения электроэнергии. Предполагается, что таким способом из горячих растворов, содержащихся в геотермальных источниках Калифорнии, можно извлечь мощность, эквивалентную 100 тыс. МВт электрической мощности. Для сравнения укажем, что мощность электростанций Соединенных Штатов в настоящее время составляет ~340 тыс. МВт.

Предлагались разные способы использования энергии горячих растворов. Один из них состоит в том, что пароводяную смесь про-

пускают через центробежный сепаратор, где жидкая фаза отделяется, а пар затем используется в стандартной реактивной паровой турбине. Такая схема использована в Уайракей (Новая Зеландия) и на электростанции в Серро-Прието (Мексика). Содержание солей в этих источниках составляет $\sim 1/10$ от их концентрации в растворах месторождений Солтон-Си, и ясно, что высокая концентрация солей в месторождениях Солтон-Си препятствует применению такой схемы.

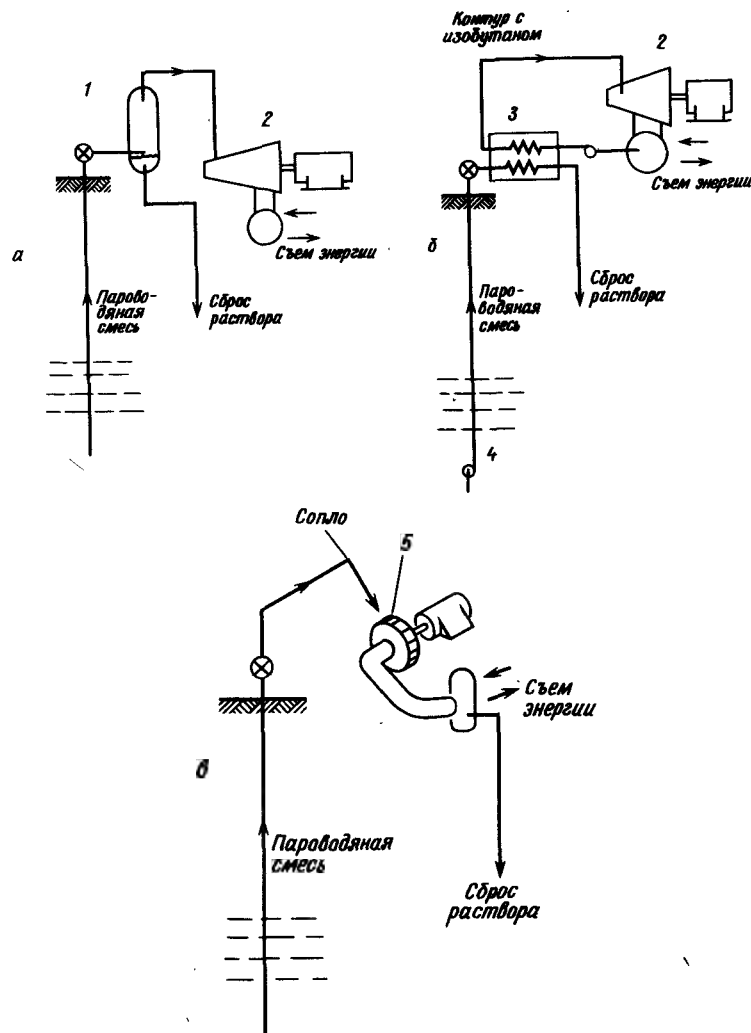
Второй способ использования горячих растворов — это схема с вторичным теплоносителем, в которой горячий раствор перекачивается под давлением, чтобы предотвратить его вскипание в теплообменнике, где его тепловая энергия передается какой-либо рабочей жидкости, не вызывающей коррозии, например изобутану. Затем эта жидкость используется в системе турбогенератора с циклом Ренкина для производства электроэнергии.

Учитывая коррозионные свойства геотермальных растворов, легко понять, что обеспечение надежной работы подземного насоса и теплообменника, требуемых в такой схеме, является сложной проблемой, практически ограничивающей использование данного метода.

Для осуществления третьего способа по расчетам потребуются капитальные вложения порядка 200 долл/кВт, а стоимость произведенной мощности составит 0,32 цент/кВт. Это дешевле, чем для двух предыдущих способов. Предлагаемый способ состоит в том, что геотермальный раствор перекачивают на поверхность, как это сейчас делается в Уайракей и Серро-Прието, а затем весь поток жидкости направляют в сопло, чтобы понизить давление и увеличить скорость.

Кинетическую энергию полного потока жидкости можно затем использовать для производства электроэнергии в некорродирующей активной турбине, выполненной по аналогии с типичными гидроэлектрическими устройствами. По расчетам при использовании такой схемы будет производиться в 1,6 раза больше электроэнергии для данной геотермальной скважины, чем при использовании схемы с центробежным сепаратором или схемы с вторичным теплоносителем. Так как число механических устройств на поверхности невелико, капитальные затраты уменьшаются, даже несмотря на необходимость защиты от растворов, обладающих коррозионными свойствами.

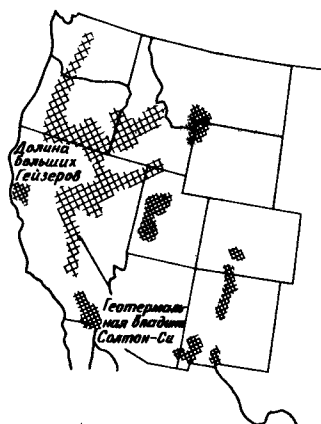
Все три схемы представлены на фиг. 6.1. Отметим, что в схеме с сепаратором (фиг. 6.1, а) и в схеме с вторичным теплоносителем (фиг. 6.1, б) геотермальный раствор сбрасывается из системы при более высокой температуре, чем температура на выходе из турбины



Ф и г. 6.1. Способы получения энергии из горячих геотермальных растворов [1].

а — схема с сепаратором; б — схема с вторичным теплоносителем; в — схема полного теплового потока. 1 — центробежный сепаратор; 2 — турбогенератор; 3 — теплообменник; 4 — глубинный насос; 5 — активная радиальная турбина.

и температура горячих сбросных вод. Поэтому при сопоставимых к.п.д. турбин во всех схемах схема полного потока (фиг. 6.1, в) всегда имеет более высокий общий к.п.д.

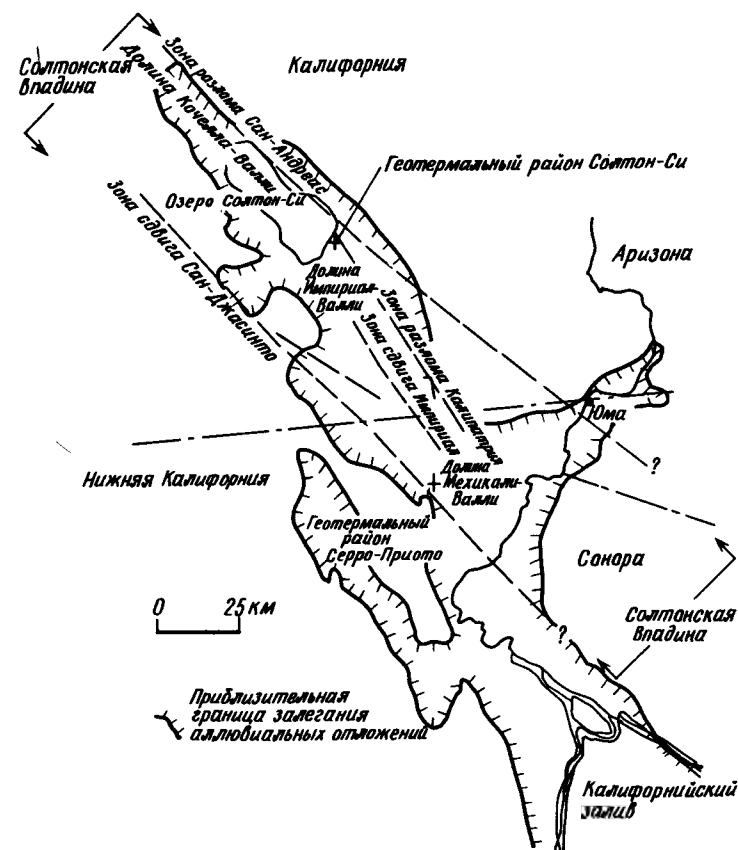


Ф и г. 8.2. Выявленные и потенциальные геотермальные районы на западе Соединенных Штатов.

Распространенность и характеристика ресурсов геотермальных растворов

На фиг. 6.2 показано распределение уже эксплуатируемых и потенциальных геотермальных месторождений на западе Соединенных Штатов. На карту нанесены месторождения сухого пара, горячих сухих пород, а также месторождения горячих подземных вод. Единственной установкой, использующей геотермальное тепло, является ГеоТЭС "Большие Гейзеры", работающая на сухом паре.

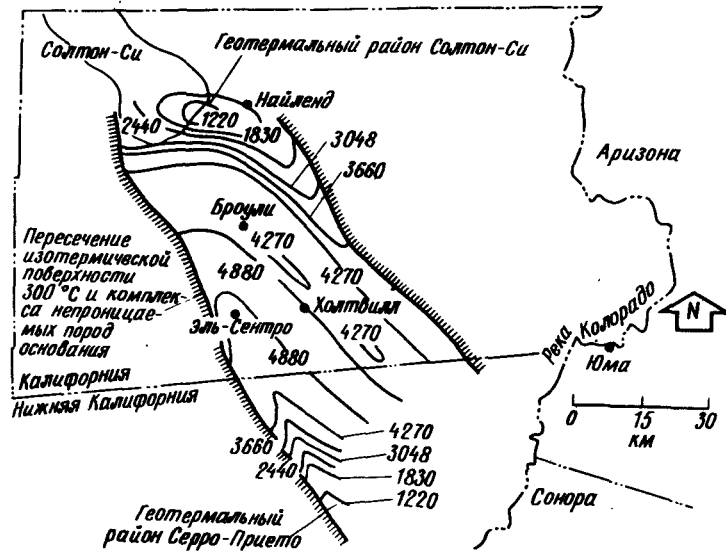
Большой интерес представляет район, являющийся частью западной геотермальной провинции и расположенный на юге Калифорнии и северо-западе Мексики. Топографически этот район представляет собой участок суши, примыкающий к Калифорнийскому заливу и включает долины Кочелла-Валли, Импириал-Валли, Мехикали-Валли и озеро Солтон-Си (фиг. 6.3). Весь район, уровень которого ниже уровня соседних с ним областей, называется Солтонской впадиной. Геотермальные источники обнаружены как в долине Импириал-Валли (геотермальный район Солтон-Си), так и в долине Мехикали-Валли (геотермальный район Серро-Прието). Оба района, очевидно, отражают одну и ту же геологическую систему тепловых потоков в этой части земного шара.



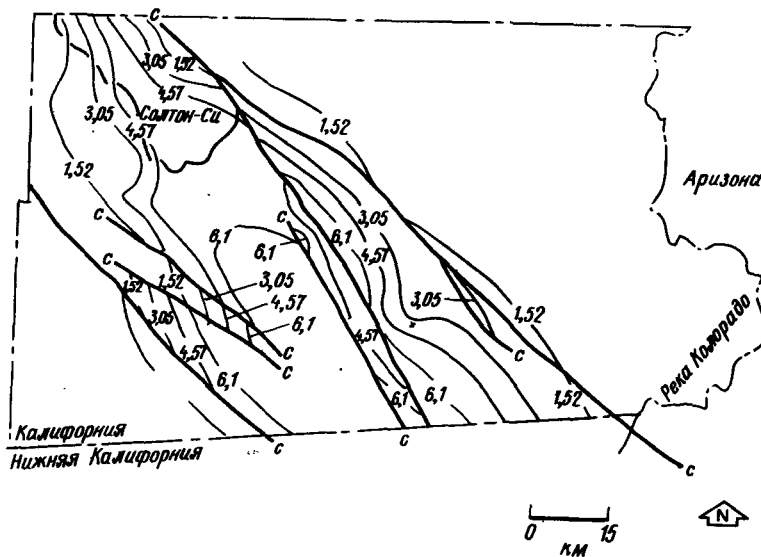
Ф и г. 8.3. Схематическая карта Соптонской впадины [1].

МОЩНОСТЬ И РАЗМЕЩЕНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ГОРЯЧИХ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ ВОД В СОЛТОНСКОЙ ВПАДИНЕ

Некоторые характеристики геотермальных источников можно определить даже несмотря на то, что их размещение в Солтонской впадине известно недостаточно точно. Прямыми наблюдениями установлено, что на территории Солтон-Си и Серро-Прието имеются геотермальные воды с температурой более 300°C. На основании измерений температуры в скважинах различной глубины и в термальных источниках можно сделать вывод, что растворы с такой высокой температурой должны быть и в других местах данного района.



Ф и г. 6.4. Глубина залегания изотермы 300°C в Солтонской впадине, м [1].



Ф и г. 6.5. Глубина залегания комплекса пород основания в районе долины Импириал-Валли [1].
 — 3.05 — верхняя поверхность пород основания, км (ниже уровня моря); с — с — разломы в породах основания.

На фиг. 6.4 на основе карт и геологических разрезов, составленных Геологической службой США, построена поверхность изотермы 300°C . Некоторые ученые считают, что данные Геологической службы — это лишь робкая экстраполяция температур, ожидаемых на глубине. Более смелая экстраполяция данных о приповерхностных градиентах температуры дает основания полагать, что на глубине можно ожидать еще более высоких температур.

Из фиг. 6.4 следует, что в южной части озера Солтон-Си и в Серро-Прието изотерма 300°C лежит на глубине ~ 1220 м. В других местах она расположена на большей глубине. Максимальная глубина изотерм 300°C достигается юго-восточнее Эль-Сентро, восточнее Холтвилла и вблизи Броули. По данным работы [2], в этих местах особенно велики геотермические градиенты.

На фиг. 6.5 представлена поверхность комплекса пород основания. В принципе эта поверхность очень важна, так как она представляет собой предельную глубину, на которой могут быть получены геотермальные растворы. Предполагается, что проницаемость пород основания практически равна нулю, т.е. жидкости в них не проникают.

Сравнивая верхнюю и нижнюю границы пород, содержащих геотермальные растворы с температурой выше 300°C , можно видеть, что количество этих растворов чрезвычайно велико. Хотя для всей территории долин Импириал-Валли и Мехикали-Валли эта мощность точно не определена, сделана оценка для той части геотермального района Солтон-Си, где проводилось пробное бурение. По предварительным данным, на этой площади породы, содержащие геотермальные растворы с температурой выше 300°C , занимают $\sim 93,6 \text{ км}^2$ и залегают на глубине $\sim 3,2$ км.

Полагая среднюю пористость породы равной 10%, можно оценить запасы лишь разведанной части бассейна в $3 \cdot 10^{10} \text{ м}^3$. Если же определить геотермальные ресурсы Солтон-Си как объем породы, насыщенной геотермальными водами с температурой более 300°C и залегающей на глубине до 3000 м, то этот объем составит $\sim 20 \cdot 10^{10} \text{ м}^3$.

Чтобы оценить эту величину, полезно сопоставить ее с годовой производительностью одной скважины данного геотермального района. По данным Отте [3], производительность скважины Ривер-Ранч составляет $\sim 0,7 \cdot 10^6 \text{ м}^3/\text{год}$.

При такой годовой производительности скважина Ривер-Ранч выдаст $3 \cdot 10^{10} \text{ м}^3$ геотермальных вод за 40 тыс. лет. Предполагая, что производительность каждой новой скважины, пробуренной в разведанной части геотермального района Солтон-Си, составит в среднем $0,35 \cdot 10^6 \text{ м}^3/\text{год}$ в течение 20 лет, легко рассчитать, что для истече-

ния $3 \cdot 10^{10} \text{ м}^3$ геотермального раствора нужна система из ~4000 таких скважин. Поэтому можно сделать достаточно обоснованное заключение, что геотермальные ресурсы бассейна Солтон-Си можно успешно эксплуатировать в течение 20-летнего периода времени, необходимого для окупания затрат на создание электростанций.

Если пробурить 4000 скважин сечением $0,046 \text{ м}^2$ каждая, то теоретически они способны вырабатывать мощность 92 тыс. МВт в течение 20 лет. Поскольку общая мощность всех электростанций в Соединенных Штатах составляет сейчас 340 тыс. МВт, следует признать, что геотермальный район Солтон-Си, каким он в настоящее время представляется нам после разведочного бурения, является весьма важным естественным источником энергии.

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ РАСТВОРОВ

В табл. 6.1 приведены результаты химического анализа геотермальных растворов [3]. Имеются и другие данные. Данные Хелгесона (столбец 2) относятся к растворам с температурой выше 300°C . Предположительно такова же температура растворов, представленных в столбцах 1, 3 и 4. В столбце 5, по-видимому, представлены результаты для более холодного раствора. Видно, что содержание солей в растворах очень высокое.

Можно оценить изменение солёности в зависимости от места бурения (данные для Аризоны и для геотермального района Солтон-Си). На основании исследования удельного электрического сопротивления Элдера и др. [2] полагают, что имеют место региональные градиенты солёности, так что солёность минимальна в районе реки Колорадо вблизи Юма (столбец 5) и увеличивается к северо-западу в направлении к озеру Солтон-Си (столбцы 1 – 3). Хелгесон [4] отмечает, что солёность меняется с глубиной, и дает теоретическое обоснование предположения, что в геотермальном районе Солтон-Си солёность резко возрастает на глубине 900 – 1200 м и достигает там 250 – 350 г/кг.

Отте [3] приводит другие важные характеристики химического состава геотермальных растворов. Химический состав раствора, извлекаемого из скважины Ривер-Ранч в течение года, практически не меняется. Это означает, что изменения солёности подземного бассейна, питающего скважину Ривер-Ранч, малы. Такой вывод согласуется с утверждением Хелгесона о том, что на территории геотермального района Солтон-Си солёность воды на глубинах 900 – 1200 м более или менее постоянна.

Таблица 6.1

Анализ растворов из геотермальных скважин
в Солтон-Си, Серро-Прието и Юма

Элемент	Содержание, мг/л				
	Найлэнд			Серро-Прието	Аризона
	скважина 39	скважина 36	скважина 57	МЗ	Масгроув 1
	1	2	3	4	5
Натрий	50 400	53 000	10 600	5 610	141 ¹⁾
Калий	17 500	16 500	1 250	1 040	—
Кальций	28 000	27 800	1 130	320	148
Литий	215	210	40	14	—
Магний	54	10	74	— ²⁾	43
Стронций	400	440	65	27	—
Барий	235	250	3	57	—
Рубидий	135	70	—	— ²⁾	—
Цезий	14	20	—	— ²⁾	—
Железо	2 290	2 000	0,7	— ²⁾	—
Марганец	1 400	1 370	6,4	— ²⁾	—
Свинец	102	80	—	— ²⁾	—
Цинк	540	500	—	— ²⁾	—
Серебро	— ²⁾	— ²⁾	—	0,05	—
Медь	6	— ²⁾	—	0,09	—
Кремний	400	400	120	— ²⁾	16
Хлор	155 000	155 000	19 700	9 694	188
Бор	390	390	100	12 ³⁾	—
Фтор	15	— ²⁾	1	0,66	—
Сера (всего)	— ²⁾	30	—	≈ 10	—
Общая минерализация	258 973	259 000	34 600	≈ 17 000	1 000

¹⁾ Включая калий.

²⁾ Не указано.

³⁾ Пересчитано по H_3BO_3 .

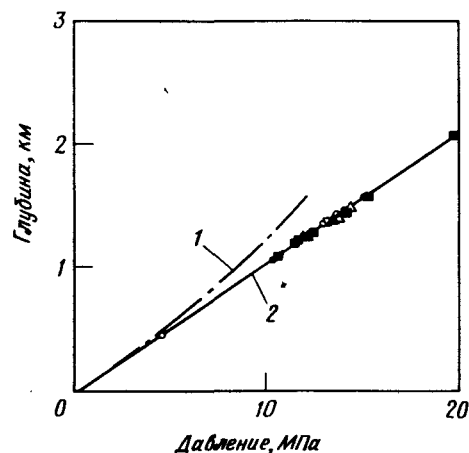
Отте отмечает также, что на проницаемость породы непосредственно вблизи скважины, возможно, неблагоприятное влияние окажет падение давления в стволе скважины в процессе эксплуатации. Уменьшение давления жидкости, находящейся в пласте, может привести к ее вскипанию, что в свою очередь вызовет осаждение минеральных

солей в порах породы. Отте указывает, что размещение и производительность скважин в геотермальном районе Солтон-Си следует планировать таким образом, чтобы предотвратить или хотя бы свести к минимуму это осаждение.

ГИДРОСТАТИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ РАСТВОРОВ

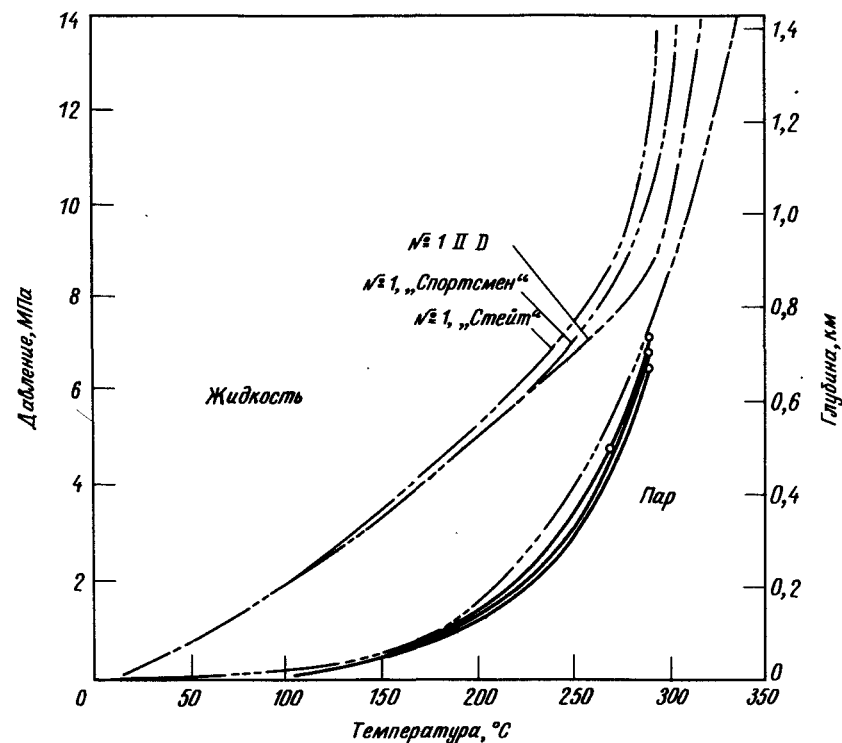
В работе Хелгесона [4] приводятся данные о гидростатическом давлении для растворов геотермального района Солтон-Си. Согласно результатам измерений в шести скважинах, давление жидкости в них соответствует нормальному гидростатическому давлению для данной местности. По предварительным данным этот вывод справедлив и для других геотермальных площадок в районе долин Кочелла-Валли – Импириал-Валли – Мехикали-Валли. Данные Хелгесона представлены на фиг. 6.6.

На фиг. 6.7, по данным Хелгесона, представлены взаимосвязь между температурой и давлением геотермальных растворов на любой глубине для некоторых скважин, а также температура и давление, необходимые для превращения жидких растворов в пар. Если давление



Фиг. 6.6. Результаты измерения давления в зоне перфорации шести геотермальных скважин.

▲ скважина № 1, "Спортсмен", ■ скважина № 1, "Элмор"; ● скважина № 2 II D; ○ скважина № 3 II D; □ скважина № 1, "Стейт", Δ скважина № 1 II D. 1 — сравнительная кривая для чистой воды (профиль температуры для скважины № 2 II D); 2 — гидростатический градиент 9,7 МПа/м.



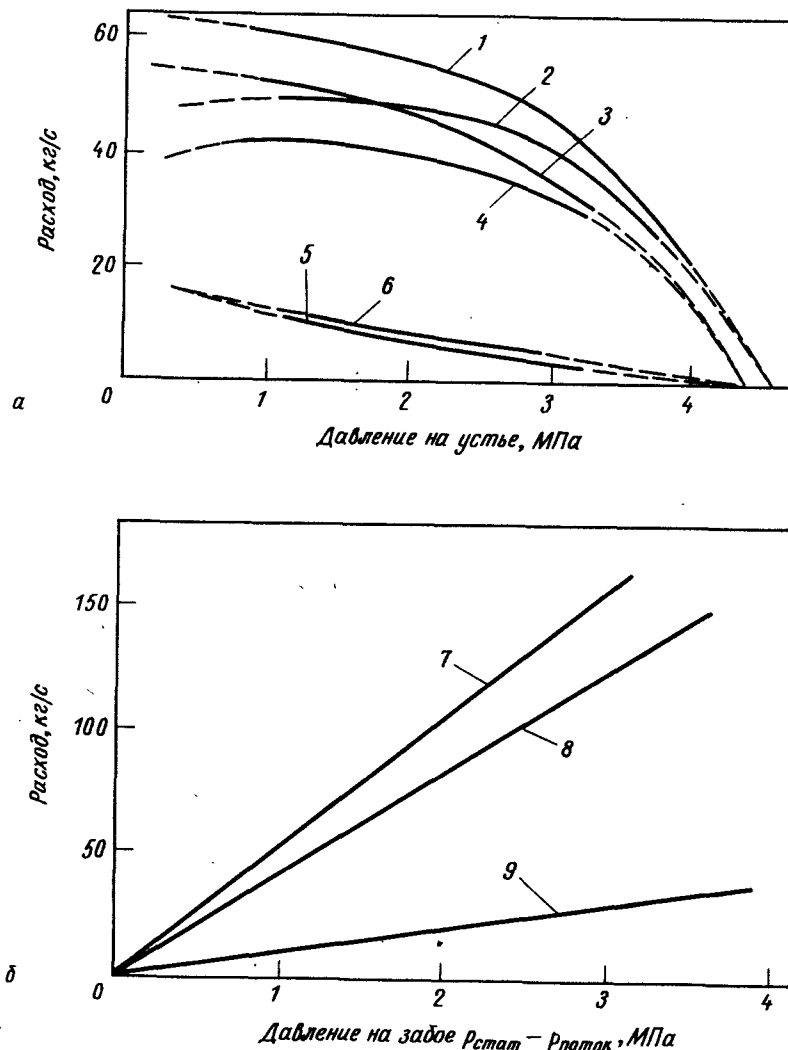
Фиг. 6.7. Диаграмма давление — температура [1].

— кривая кипения H_2O , — растворы из геотермальных скважин, — профили температуры и давления в статическом состоянии, о — появление первого пузырька.

в некоторой точке скважины искусственно понизить, раствор мгновенно вскипит.

ОЦЕНКА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СКВАЖИН

Данные о производительности четырех скважин представлены на фиг. 6.8. Данные Отте для скважины Ривер-Ранч и данные Хелгесона для скважин всей геотермальной области Солтон-Си аналогичны. Производительность скважин высока. Хелгесон отмечает, что в течение продолжительных (более 18 месяцев исследований) производительности различных скважин не наблюдалось изменений энтальпии, температу-



Фиг. 6.6. Расходы геотермальных скважин в зависимости от давления на устье скважины (а) и на забое (б) [1].

1 — скважина № 1 ПД, поток массы; 2 — скважина № 1 ПД, поток раствора; 3 — скважина № 2 ПД, поток массы; 4 — скважина № 2 ПД, поток раствора; 5 — скважина № 2 ПД, поток пара; 6 — скважина № 1 ПД, поток пара; 7 — скважина № 1, "Стейт" (из незакрепленной части скважины); 8 — скважина № 1 ПД и № 1, "Спортсмен"; 9 — скважина № 2 ПД.

ры или химического состава растворов.

Хелгесон далее указывает, что основными каналами для истечения геотермальных растворов могут служить естественные трещины в породах. Хотя в этих трещинах скапливается жидкость лишь из породы и они не являются основными резервуарами, тем не менее их проницаемость высока. Возможно, именно они обуславливают высокую производительность скважин. Таким образом, чтобы скважина имела высокую производительность, она должна пересекаться с естественными трещинами. Обеспечить это пересечение не представляет трудностей, поэтому не составит никаких проблем создание таких мощностей потоков, которые бы удовлетворили потребности описанных выше электростанций.

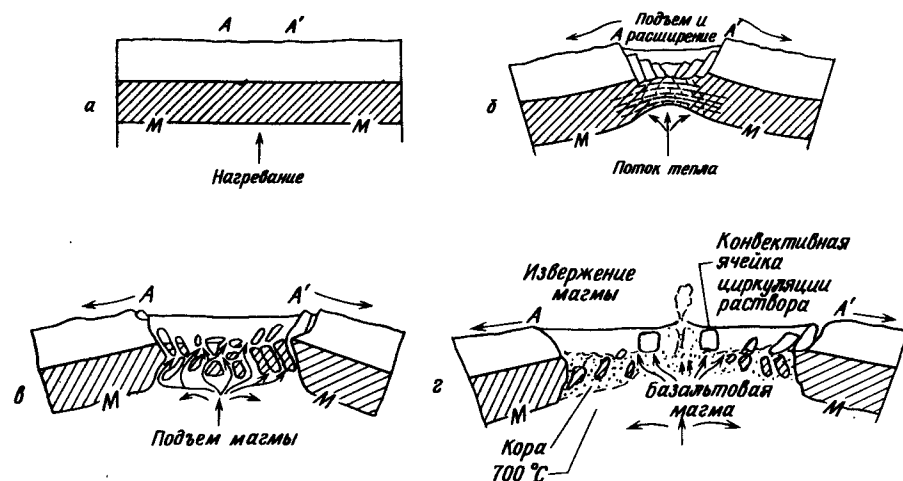
Следует отметить еще один момент, связанный с производительностью скважин. Как отмечает Отте, закачка отработанного раствора обратно в систему не представляет затруднений, так как фактически может закачиваться больше растворов, чем отбираться от системы.

МЕХАНИЗМ ПОЛУЧЕНИЯ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ В СОЛТОНСКОЙ ВПАДИНЕ

Наиболее важными в механизме получения геотермальной тепловой энергии в Солтонской впадине являются глобальные масштабы движущей силы, приводящей в действие весь механизм. Нет сомнений в том, что она будет продолжать формирование общей геотермальной системы в Солтонской впадине в течение неопределенно долгого времени независимо от степени эксплуатации ресурсов этой системы. Хотя, конечно, скорость регенерации в настоящее время неизвестна.

В механизме образования горячих геотермальных растворов в геотермальном районе Солтон-Си можно выделить два процесса: первый — просачивание воды и ее накопление в районе Импириал-Валли — Солтон-Си и второй — нагревание воды и растворение в ней солей. По-видимому, вода поступает в геотермальный район Солтон-Си из двух источников. Большая часть воды стекает с окрестных гор, а часть может поступать из реки Колорадо. Многие авторы (в том числе Хелгесон) пытаются оценить соотношение вкладов от этих двух источников главным образом потому, что именно оно определяет химический состав растворов.

Вода, поступающая в геотермальный район Солтон-Си и проникающая на глубину более 900 м, нагревается теплом мантии Земли.



Ф и г. 6.9. Модель образования разлома и подъема магмы в процессе образования Солтонской впадины [1].

Фактически эта вода становится частью конвективной ячейки (фиг. 6.9), питающей этот весьма глубокий источник тепловой энергии.

Как уже отмечалось, Солтонская впадина является топографическим продолжением Калифорнийского залива. Оба они приурочены к Восточному тихоокеанскому поднятию океанического хребта, имеющему глобальное значение. Такие хребты являются основными структурами, раздвигающими земную кору и верхнюю мантию, и представляют области подъема горячих пород мантии. Восточное тихоокеанское поднятие внедряется в Северо-американский континент в районе Солтонской впадины.

Елдерс и др. [2] описывают развитие событий после начального внедрения. На фиг. 6.9 показан разрез, проведенный параллельно основным сбросам горизонтального смещения земной коры. На фиг. 6.9, а два слоя коры лежат над горячей зоной мантии. Здесь M — точки разрыва поверхности Мохоровичича, а A и A' — точки отсчета для последующих перемещений.

На фиг. 6.9, б показаны восходящее и поперечное расширения; впадина зарождается и частично заполняется осадочными породами. На фиг. 6.9, в в расширяющуюся впадину вторгается базальтовая магма; возникают метаморфизм осадочных пород и гравитационное сколь-

жение по наклонным плоскостям сброса. На фиг. 6.9, г изображены процессы плавления пород основания (фундамента), и выдавливания риолитовой магмы. Как это следует из фиг. 6.9, б и г, развитие океанического хребта позволяет переместиться значительному количеству тепла к основанию пород, образующих Солтонскую впадину. Этого тепла достаточно не только для нагревания растворов (конвективный элемент на фиг. 6.9, г), но может развиваться даже вулканическая деятельность. Вулканическая деятельность такого типа наблюдается на южной оконечности озера Солтон-Си, в районе Обсидиан Батс.

Термодинамический анализ

В работе [1] приведен сравнительный термодинамический анализ схемы полного потока и схем с центробежным сепаратором и с вторичным теплоносителем. Авторы приходят к следующим выводам.

Поскольку полный коэффициент полезного действия любой турбины равен ~70%, схема полного потока является наиболее эффективной. В табл. 6.2 представлены ожидаемые значения производимой мощности на квадратный фут (~0,1 м²) сечения скважины. Коэффициент полезного действия системы определяется в табл. 6.2, как отношение производимой электрической мощности к мощности, которую можно извлечь из продуктов скважины. Таким образом, для данной скважины в схеме полного потока ожидаемая мощность на 60% выше, чем в каждой из двух других схем.

Это увеличение мощности обусловлено тем, что в схеме полного потока используется вся массовая скорость потока, и, следовательно, эффективность преобразования тепловой энергии в кинетическую вы-

Таблица 6.2

Ожидаемые значения производимой мощности [1]

Схема	Энергия в идеальном случае, МВт/0,1 м ²	Ожидаемая энергия, МВт/0,1 м ²	К. п. д. системы, %
С центробежным сепаратором	39,5 e_t	27,7	11
С вторичным теплоносителем	40,4 e_t	28,3	11
Полного потока	63,1 $e_w \eta^2$	44,2	18

ше. В схеме с центробежным сепаратором лишь 29% массы потока используется в виде пара в турбине; остальная часть сбрасывается в виде горячего раствора с температурой 170°C. В схеме с вторичным теплоносителем при оптимальном коэффициенте полезного действия весь раствор сбрасывается при температуре 149°C. Закачка горячего раствора обратно в систему возможна в любой схеме, так что часть неиспользованной энергии возвращается в бассейн.

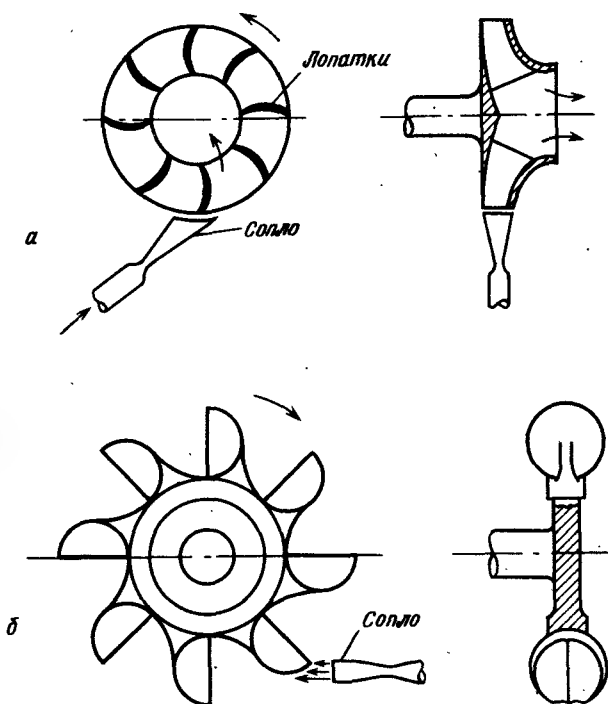
Системы турбин

Существует большое разнообразие типов турбин, но все они обычно подразделяются на два класса. Активная турбина преобразует тепловую энергию в кинетическую при падении давления лишь в сопле. Кинетическая энергия жидкости затем преобразуется в энергию вращательного движения, когда поток направляют на какой-либо тип лопаток на колесе турбины. Давление во вращающихся узлах турбины почти не изменяется. Реактивная турбина, обычно используемая для преобразования энергии газов высокого давления, приводится в действие расширяющимся газом, проходящим чрез вращающиеся лопатки, и это расширение сопровождается падением давления. Чтобы предотвратить перетекание газа, зазоры между лопатками и корпусом (или статором) должны быть очень малыми.

Следовательно, существуют два способа преобразования энергии в системе полного потока. Первый — расширение двухфазной смеси в сопле с тем, чтобы получить высокоскоростные струи, которые используются затем для приведения в действие активной турбины. При этом падение давления целиком происходит в сопле. Второй — расширение двухфазной смеси в реактивной турбине, где происходит как изменение скорости, так и падение давления.

Осевые реактивные турбины имеют более высокий к.п.д., работают обычно при более высоких скоростях, имеют несколько ступеней и, как правило, сложнее, поскольку для обеспечения заданного давления на ступени зазоры должны быть очень малыми. Нельзя, однако, ожидать, что многоступенчатые турбины будут надежными в работе, когда они непосредственно приводятся в действие смесью пара, геотермального раствора с кремнеземом, возможно, песком и другими посторонними примесями.

Из-за этого свойства рабочей жидкости турбина должна быть простой и легко обслуживаемой. Поэтому активная турбина оказыва-



Фиг. 6.10. Схемы активных турбин для системы полного потока [1].
а — радиальная турбина; б — тангенциальная турбина.

ется наиболее подходящей. Самой распространенной активной турбиной является осевая активная турбина, в которую жидкость поступает через серию сопел, расположенных по окружности колеса.

Максимальный к.п.д. как одноступенчатых, так и многоступенчатых турбин составляет ~88%. Трение на лопатках, утечки за лопатками, турбулентность и рассеяние струи будут понижать к.п.д. турбины. Кроме того, могут возникать большие осевые силы, и подавление вибраций всегда является важной задачей при создании осевых турбин.

Радиальные и тангенциальные активные турбины (фиг. 6.10) являются самыми перспективными для подобного применения. Радиальная турбина (фиг. 6.10,а) аналогична гидравлической турбине Френсиса, за исключением того, что в ней вместо входных направляющих лопаток применяются сопла. При правильном выборе углов на входе и вы-

ходе рабочего колеса жидкость будет входить в турбину радиально без тангенциальной составляющей скорости (завихрений).

В принципе к.п.д. лопаток в данных условиях может достигать 100%. Это, однако, маловероятно, так как будут иметь место потери, обусловленные турбулентностью, и могут понадобиться такие углы установки лопаток, которые сообщают жидкости на выходе из сопла некоторое завихрение. Радиальные активные турбины обладают следующими преимуществами: высокий к.п.д., малые вентиляционные потери, возможность выбора угла установки сопла, небольшие потери от рассеяния струи и минимальная вибрация. Вибрации незначительны, так как сопло расположено в плоскости колеса и осевое усилие мало.

Тангенциальные турбины (фиг. 6.10, б) имеют прообразом колесо Пелтона. Хотя оно использовалось только как гидравлическая турбина, не существует серьезных возражений против его использования для работы с двухфазной жидкостью. Это устройство может иметь к.п.д. до 95% в зависимости от угла наклона лопаток и угла на выходе. Конечно, может оказаться важным трение на лопатках, но основные потери (и недостатки) будут, вероятно, обусловлены эффектом вентилирования и рассеянием струи, так как сопла должны размещаться на некотором расстоянии от лопаток.

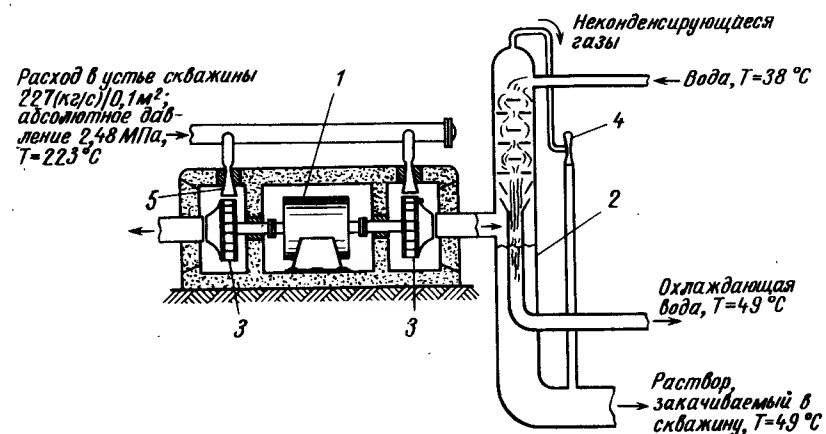
К основным преимуществам турбин этого типа следует отнести высокую эффективность, простоту изготовления (и, следовательно, низкую стоимость), малую вероятность вибрации и простоту замены и восстановления лопастей. Последнее может быть особенно важным в связи с высокой коррозионной активностью рабочей жидкости.

Обычно гидравлические устройства таких типов обладают к.п.д. рабочего колеса более 90%. Из-за отсутствия данных для режима работы с двухфазной жидкостью невозможно оценить к.п.д. при таких рабочих условиях. Тем не менее нет существенных причин для больших различий в к.п.д., и вполне вероятно, что турбина с двухфазным полным потоком будет иметь к.п.д. 90%.

Один из возможных проектов

Для обсуждения проблемы проектирования рассмотрим одну из возможных систем. Следует иметь в виду, что данный пример приводится с чисто иллюстративной целью и система не обязательно будет оптимальной. На фиг. 6.11 показана установка с радиальной турбиной.

Так как площадь струи в 17 раз больше площади входа в турбину, то необходимо несколько сопел (или) колес. В рассматриваемой сис-



Фиг. 6.11. Схема системы полного потока [1].

1 — генератор переменного тока; 2 — модифицированный барометрический конденсатор; 3 — радиальные турбины: диаметр 2,07 м, окружная скорость 3600 об/мин, 6 сопел на рабочее колесо, выход 44 МВт/0,1 м²; 4 — паровой инжектор; 5 — сопло.

теме один генератор приводится в движение двумя турбинами с шестью соплами на каждое колесо. Рабочие колеса турбины имеют диаметр 2,07 м, вращаются со скоростью 3600 об/мин, содержат по девять лопаток, расположенных с одинаковым шагом, и (при принятом к.п.д. турбины 90%) производят 44 МВт электроэнергии при сечении скважины 0,1 м². Следовательно, для обеспечения такого энергетического выхода требуются две скважины диаметром 244 мм с производительностью ~ 113,5 кг/с каждая.

Рассматриваемая система невелика по сравнению с обычными гидравлическими установками, но окружная скорость колеса гораздо больше обычной и приводит к высокому уровню напряжений (345 — 480 МПа) для стального колеса. Напряжения линейно понижаются с уменьшением плотности для более легких материалов, однако может оказаться более целесообразным применение других способов снижения окружной скорости колеса: уменьшение массового расхода, уменьшение угла установки сопла, применение ступенчатого изменения давления.

Двухступенчатое устройство, например, в достаточной степени уменьшает окружную скорость, так что напряжение составляет 40% от его прежнего значения, но система становится более сложной и

к.п.д. ее, возможно, понижается. Тем не менее существует множество вариантов, и основной целью программы исследований и разработок будет оптимизация системы.

Барометрический конденсатор можно сделать охлаждаемым и модифицировать его, как указано на фигуре, с тем чтобы возвращать охлаждающую воду без излишнего загрязнения отработанным геотермальным раствором. Охлаждающая вода может подаваться либо через градирню, либо через бассейн с разбрызгивающей системой. Предварительные расчеты показывают, что при уровне охлаждения $\sim 11^\circ\text{C}$ на каждый 44-мегаваттный блок (расход 227 кг/с) потребуется расход охлаждающей воды 4000 кг/с на участке между конденсатором и бассейном. Сюда входят дополнительные 77 кг/с сконденсированного пара.

Потери на испарение при охлаждении составят 78 кг/с. В зависимости от потерь на отток будут иметь место либо небольшой прирост, либо потери потока охлаждающей воды. Поскольку обычно в рассматриваемом районе не бывает сильных преобладающих ветров, то можно было бы использовать конструкцию круглого бассейна с разбрызгивающими форсунками, размещенными с равным шагом по окружностям, расположенным через каждые 7,6 м. Такой бассейн эффективно функционировал бы за счет вертикального движения воздуха в условиях естественной конвекции.

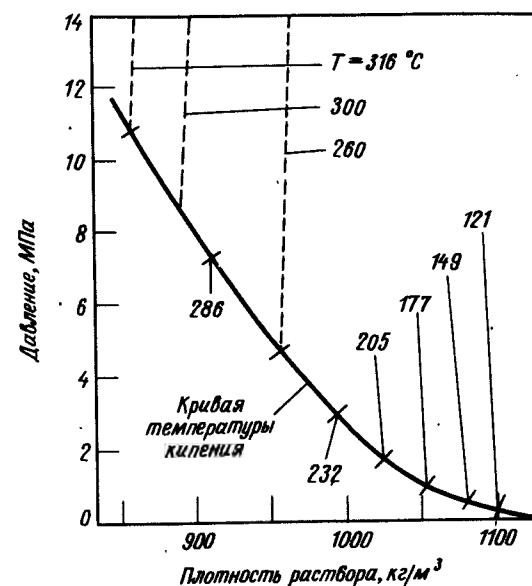
Однако чтобы выбрать оптимальную охлаждающую систему, необходимы подробные сведения о составе сконденсированной паровой фазы. Удаление концентрированного геотермального раствора, выходящего из барометрического конденсатора, будет осуществляться путем его инъекции в несколько скважин, число и глубина которых соответствуют числу и глубине эксплуатационных скважин.

Химические и коррозионные факторы

Основная трудность использования геотермальных растворов озера Солтон-Си – Мехикали-Валли связана с их химическим составом (табл. 6.1). Эти растворы чрезвычайно коррозионно-активны, вызывают отложение накипи и при определенных условиях насыщения из них осаждаются соли.

ФИЗИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОВЫЕ СВОЙСТВА ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ РАСТВОРОВ

Плотность геотермального раствора меняется с давлением и температурой (фиг. 6.12). Эта кривая рассчитана в предположении отсут-



Фиг. 6.12. Свойства геотермального раствора [1].

ствия мгновенного парообразования. Плотность раствора на выходе из турбины после испарения 36,8% воды равна 1220 кг/м^3 . Средняя плотность раствора геотермального месторождения равна $\sim 1000 \text{ кг/м}^3$.

Следовательно, гидростатическое давление в коллекторе значительно меньше, чем давление столба жидкости в поглощающих скважинах. Для скважины глубиной 1,55 км разность в этих давлениях на забое составляет 3,8 МПа. Если кремнезем не закупоривает поглощающую скважину и давление нагнетания противодействует давлению откачки, то каждая поглощающая скважина примет до $317 (\text{кг/с})/0,1 \text{ м}^2$, прежде чем понадобятся насосы для закачки. Так как производительность каждой продуктивной скважины оценивается в $227 (\text{кг/с})/0,1 \text{ м}^2$, то, возможно, для закачки не потребуется значительной энергии.

В разделах, посвященных термодинамике и системам турбин, предполагалось, что свойства раствора примерно соответствуют свойствам того же количества чистой воды. Поскольку 1 кг раствора на устье скважины содержит только 0,743 кг воды и 0,257 кг солей, то тепло, которое можно получить от воды, составляет лишь 70% от

значения, указанного в таблицах водяного пара, плюс тепло, которое можно получить, охлаждая соль.

Согласно расчетам, тепло, которое можно получить для совершения работы при прохождении раствора через сопло, равно ~ 200 кДж/кг, примерно на 9% меньше, чем в случае чистой воды. В этом смысле энергетические расчеты в термодинамическом анализе могут быть завышены приблизительно на эти 9%. Однако с учетом всех использованных факторов ожидаемые значения мощности, приведенные в табл. 6.2, не содержат серьезной погрешности.

КОРРОЗИЯ

Геотермальные растворы известны своими коррозионными свойствами. Растворы района озера Солтон-Си кислые. Титан менее активен в нейтральном или щелочном растворе, чем в кислом, и особенно подвержен трещинной коррозии и водородному охрупчиванию в очень кислой среде. Поэтому для использования в среде калифорнийских геотермальных растворов титан, возможно, окажется непригодным. Содержащая 13% хрома ферритовая нержавеющая сталь при твердости по Роквеллу от $HR_B=60$ до $HR_C=28$ с успехом применяется в среде геотермальных растворов в Новой Зеландии; следует рассмотреть возможность ее применения в Калифорнии. Известно, что монель-металл, инконель и хастеллой работают неудовлетворительно. Единственными коррозионно-стойкими материалами в растворах Солтон-Си являются керамика, тантал, пластики и, возможно, цирконий.

Были разработаны методы танталового покрытия, что позволяет производить стальные трубы с танталовым покрытием, но стоимость, возможно, будет высока. Удовлетворительными свойствами могут обладать высокотемпературные пластмассы, такие, как тефлон. Стекланную облицовку или вообще стекло также можно иметь в виду при использовании в качестве конструкционного материала для трубопроводов.

На сопла и детали турбины можно, вероятно, наносить танталовое покрытие, но если требуется очень высокая абразивная стойкость, то может потребоваться облицовка карбидами тантала. Хотя технология этих перспективных материалов достаточно развита, тем не менее необходима программа разработок, чтобы применить эти знания для промышленного производства коррозионно-стойких деталей и для борьбы с образованием накипи.

ОБРАЗОВАНИЕ НАКИПИ

В трубопроводах вблизи устья каждой обследованной скважины образуется накипь, состоящая из магнетита (Fe_3O_4), хаусманита (Mn_3O_4) и кремнезема (SiO_2). Накипь образуется на всякой поверхности. Даже такие инертные материалы, как тефлон, вскоре покрываются толстым слоем накипи. Образование такой накипи, по-видимому, связано со свойствами материалов, применяемых для обсадки скважин. Между ионами железа и водой происходит ряд реакций типа $2 Fe^{+3} + Fe^{+2} + 4 H_2O \rightleftharpoons Fe_3O_4 + 8 H^+$.

Подобные реакции протекают между ионами марганца и водой. Эти реакции обратимы, пока геотермальный раствор соприкасается с накипью, и когда pH раствора достигнет ~ 3 , дальнейшее образование накипи не должно происходить. Считается, что в породе солеотложение не происходит и концентрация раствора постоянна.

Если, однако, раствор соприкасается с материалом, поглощающим кислоту (например, известняком), или активно реагирующим металлом (например, железом), равновесие нарушается вследствие удаления кислоты и образуются новые накипь и кислота, и железо выводится из раствора. Таким образом, предполагается, что образование накипи можно свести к минимуму, избегая применения в скважине и наземном оборудовании материалов, реагирующих с кислотой при $pH = 3$.

Обычный цемент, возможно, будет реагировать с раствором и вызывать образование накипи до тех пор, пока не отложится достаточный слой накипи, который защитит цемент от контакта с раствором. Цементы, используемые при завершении скважин, должны быть стойкими в очень кислой среде (например, цемент на основе гипса).

НАСЫЩАЕМОСТЬ ГЕОТЕРМАЛЬНОГО РАСТВОРА

С использованием результатов анализа Хелгесона (табл. 6.1, столбец 2) был пересчитан состав геотермального раствора как смеси группы химических соединений. Концентрации этих соединений и их растворимость при $100^\circ C$ приведены в табл. 6.3. Растворимость возрастает с ростом температуры. Видно, что раствор NaCl наиболее близок к насыщению, и так как пар улетучивается из раствора, то после испарения 61,1% воды NaCl начнет осаждаться. Такие концентрации никогда не достигаются в системе полного потока.

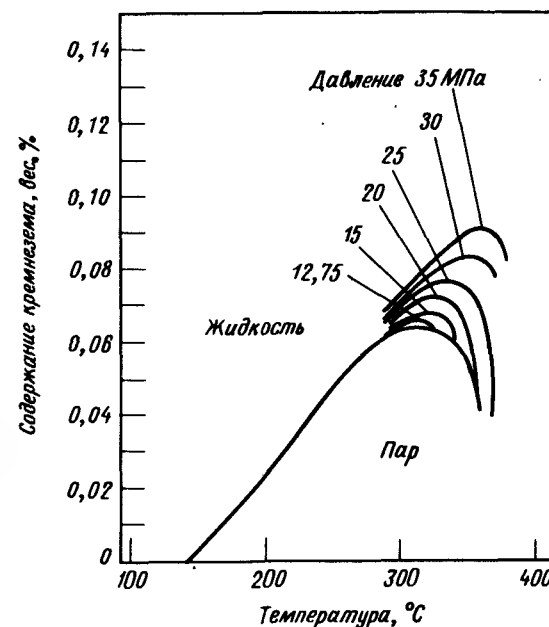
Таблица 6.3

Концентрации и растворимость соединений [1]

Соединения	Концентрация, г/см ³	Растворимость при 100°С, г/см ³	Насыщенность раство- ра (концентрация/рас- творимость)
NaCl	0,1345	0,346	0,389
KCl	0,0315	0,502	0,063
CaCl ₂	0,0772	1,41	0,055
LiCl	0,00128	1,13	0,0011
MgCl ₂	0,000039	0,374	0,00010
SrCl ₂	0,000796	0,069	0,0089
BaCl ₂	0,000375	0,523	0,00072
RbCl	0,000099	1,231	0,00008
CsCl	0,0000253	2,40	0,000010
FeCl ₃	0,00581	4,75	0,00122
MnCl ₃	0,00402	Велика	Мала
PbCl ₂	0,000107	0,0296	0,0036
ZnCl ₂	0,00104	5,45	0,00019
CuCl ₂	0,0000169	0,957	0,000018
SiO ₂	0,000400	—	—
H ₂ O	0,8862	∞	0

Расчетное паросодержание в местах наибольшей концентрации (выход из сопла, камера турбины, барометрический конденсатор) равно 36,8%, что эквивалентно удалению 0,326 кг воды из 1 кг первоначального раствора, или степени насыщения ~70%. При температуре 25°С растворимость NaCl равна 0,316 г/см³. Таким образом, если бы раствор охлаждался отдельно от пара, то он достигал бы состояния насыщения после удаления 57,4% воды. В системе полного потока концентрации никогда не достигают таких значений. Таким образом, затруднений, связанных с образованием соли, не ожидается.

Растворимость SiO₂ в табл. 6.3 не указана, поскольку она является сложной функцией температуры и давления. По всей вероятности, концентрация SiO₂ в формациях находится в состоянии равновесия, близком к насыщению, и очень близка к соответствующей концентрации раствора кварца в воде или аморфного кремнезема в воде с поправкой на присутствие других солей.



Ф и г. 8.13. Нижняя двухфазная область системы кремнезем — вода [1].

На фиг. 6.13 показана нижняя двухфазная область системы кремнезем — вода с поправкой на присутствие других солей в предположении, что между кремнеземом и другими солями не протекает химических реакций. Если действительная растворимость такая же, как у аморфного кремнезема в горячей воде, то кремнезема в растворе при более высоких температурах будет в 2,5 раза больше.

Ниже ~230°С действительное значение растворимости будет близко к указанному. Поэтому при прохождении геотермального раствора вверх по скважине и через сопло кремнезем будет непрерывно осажаться. Если предположить, что начальная температура в месторождении 300°С, то раствор будет содержать более 600 мг/л SiO₂, который будет особенно слабо удерживаться в растворе на выходе из сопла (49°С). При производительности скважины 227 (кг/с)/0,1 м² кремнезем будет оседать на выходе из конденсатора со скоростью 11,8 т/сут. Этот аморфный кремнезем создаст серьезную проблему,

если он не будет оставаться в состоянии коллоидной суспензии от момента извлечения из скважины до момента закачки отработанного раствора в недра. Если кислотность раствора не будет нарушаться, то следует ожидать, что кремнезем останется в коллоидном состоянии.

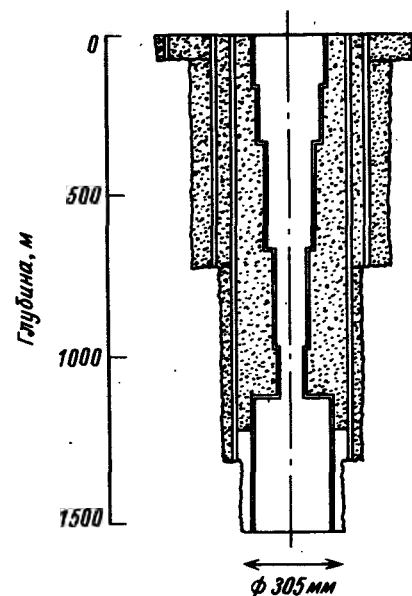
КОНСТРУКЦИЯ КРЕПЛЕНИЯ СКВАЖИН

Отложение солей в нижней части скважины может привести к дополнительным трудностям. При завершении скважины пришлось столкнуться с несколькими проблемами. Во-первых, при креплении средней части скважины в кольцевом пространстве между обсадными трубами не должна находиться вода. Если вода останется там при цементировании, то она будет нагреваться при поступлении пара и, расширяясь может разрушить внутреннюю обсадную колонну или подъемные трубы.

Во-вторых, скорости потока от места образования пара до устья скважины должны быть достаточно высокими, чтобы не происходило заметного проскальзывания паровой фазы. При низких скоростях паровая фаза (пузырьки) имеет тенденцию подниматься быстрее, чем жидкость. Это вызывает повышение концентрации солей, и в скважине, в конце концов может быть достигнута концентрация, при которой соль начнет осаждаться. Если поддерживать скорости потока выше 30,5 м/с, то можно получать двухфазную смесь без увеличения концентрации солей.

На фиг. 6.12 видно, что средняя плотность геотермального раствора равна 900 кг/м³. Таким образом, производительность 227 кг/с эквивалентна 0,25 м³/с. Так как этот расход относится к 0,1 м² площади скважины, то скорость раствора в нижней части трубы равна 2,71 м/с. Чтобы обеспечить скорость 30,5 м/с, диаметр труб должен быть уменьшен до 0,3 от своего начального значения. Например, обсадные трубы диаметром 244 мм в нижней части должны быть уменьшены до диаметра в 73 мм. По мере того как смесь раствор — пар поднимается вверх по трубе и содержание пара увеличивается, диаметр трубы следует снова увеличивать, чтобы предотвратить чрезмерное увеличение скорости и рост перепада давлений вследствие потерь на трение.

Принимая верхний предел скорости равным 62 м/с можно определить рабочую площадь обсадной трубы непосредственно из уравнения неразрывности. Так как удельный объем равен ~0,0155 м³/кг



Фиг. 6.14. Схема обсадки скважины [1].

в устье скважины, то площадь равна ~0,058 м², или для скважины диаметром 244 мм диаметр трубопровода на поверхности должен быть равен 193 мм.

На фиг. 6.14 представлена схема обсадки скважины и эксплуатационного трубопровода. Верхняя колонна труб диаметром 762 мм устанавливается в скважине диаметром 914 мм, пройденной на глубину 61 м. Затем бурится ствол диаметром 610 мм, глубиной ~701 м и устанавливается обсадная колонна диаметром 457 мм. Затем проходится скважина диаметром 444 мм до глубины 1326 м, и в нее опускается колонна труб диаметром 346 мм и тщательно цементируется. Скважина завершается на глубине 1525 м при диаметре буровой головки 305 мм. Нитка эксплуатационного трубопровода изготовлена из коррозионно-стойкого материала с сальником, установленным на глубине 1200 м на секции трубопровода 244 мм, расположенной на глубине 1113 — 1525 м, и перфорированного от 1403 м до забоя скважины.

От 1113 м вверх на 152,5 м идут трубы диаметром 76 мм, затем на 305 м — трубы 102 мм, на 366 м — трубы 143 мм, на 152,5 м — трубы 194 мм и на 137 м — трубы 219 мм. Скорости потока на протяжении всего такого трубопровода будут заключены в пределах 30,5 — 61 м/с. До сих пор не ясно, должно ли быть все кольцевое простран-

ство между эксплуатационным трубопроводом и обсадными трубами зацементировано полностью или же частично оставлено открытым, чтобы облегчить замену.

Влияние на окружающую среду

Геотермальная энергетическая система полного потока почти не будет оказывать вредного воздействия на окружающую среду. Так как теплоноситель закачивается после использования на ту же глубину, откуда он был извлечен, то не будет происходить оседания почвы, скопления солей и концентрированных растворов на поверхности или в водоносных пластах. Неконденсирующиеся газы отсасываются и поступают в скважины для сброса. Таким образом, атмосфера не будет загрязняться.

Необходимо иметь запас менее концентрированного раствора, циркулирующего между барометрическим конденсатором и охлаждающей системой. Для энергоблока мощностью 220 МВт понадобится $141\,500\text{ м}^3$ этого раствора при скорости циркуляции $\sim 20\,430\text{ кг/с}$. Этот раствор можно поместить в непроницаемый земляной бассейн радиусом $\sim 120\text{ м}$ и глубиной $1,8\text{ м}$. Не должно быть контакта между раствором в бассейне и окружающей средой или грунтовыми водами.

Если турбины не экранировать, то они производят шум. Но так как турбины обладают большой мощностью, то для них и так требуются массивные защитные кожухи. Может оказаться целесообразным расположить всю электростанцию, кроме системы охлаждения воды и группы трансформаторов, ниже уровня земли.

На территории любой полностью оборудованной геотермальной площадки должны разместиться группы трансформаторов, охлаждающие бассейны, скважины и генераторы, занимающие $\sim 5\%$ этой площади. Такая система должна быть способной извлечь всю геотермальную энергию, запасенную в недрах.

Оценки стоимости

Оценить стоимость действующей геотермальной системы трудно, поскольку не решены еще инженерные проблемы, касающиеся как материалов, так и оборудования; неизвестна также оптимальная система охлаждения. Тем не менее желательно провести ориентировочные экономические расчеты, чтобы оценить целесообразность разработок геотермальной энергии.

Была сделана попытка получить оценку с точностью до 30% с учетом стоимости аналогичного заводского оборудования в химической и нефтяной промышленности, а также других геотермальных установок. Такая оценка, по-видимому, может быть как завышенной, так и заниженной.

ПРЕДПОЛОЖЕНИЯ

Предполагается, что энергоблок обслуживается десятью эксплуатационными скважинами номинальным диаметром 244 мм , приводящими в движение 3 – 5 генераторов переменного тока с двумя турбинами каждый. В случае использования радиальных турбин каждая турбина работает от одной скважины и две турбины обеспечивают привод одного генератора, так что всего в блоке пять агрегатов из турбин с генераторами. При использовании тангенциальных турбин каждая турбина работает от одной скважины и на каждый генератор приходится по четыре турбины.

Пиковая мощность блока 220 МВт, и при коэффициенте использования 80% годовое производство электроэнергии составит $1,53\text{ млрд. кВт}\cdot\text{ч}$. Предполагается, что каждый энергоблок сооружается независимо от других, так что они не имеют общих мастерских, систем обслуживания, трансформаторных подстанций и административного аппарата.

Наконец, все оценки основаны на предположении о том, что исследование и разработки завершены и уже получен опыт эксплуатации первой опытно-промышленной установки. Первая установка, вероятно, будет самой дорогой.

КАПИТАЛЬНЫЕ ЗАТРАТЫ

Основными статьями капитальных затрат являются эксплуатационные и нагнетательные скважины, энергетическая установка и здания, где размещаются турбогенераторы, турбины и генераторы переменного тока, а также высоковольтная подстанция.

При оценке стоимости эксплуатационных и нагнетательных скважин, пробуренных в открытом море на ту же глубину, к этой сумме была добавлена стоимость уникального эксплуатационного трубопровода, как если бы он был изготовлен из чистого титана, хотя он, конечно, может быть изготовлен из другого материала и стоит как дороже, так и дешевле. Коэффициент потери скважин был принят равным $0,2$, т.е. предполагалось, что при бурении одна из пяти скважин

окажется неудачной. Стоимость неудавшихся скважин распределялась на стоимость бурения завершенных скважин в размере 75% от стоимости основного бурения без стоимости эксплуатационного трубопровода. Срок эксплуатации скважины принимался равным 20 годам. Результаты оценки следующие:

Статья затрат	Затраты, долл.
Бурение и обсадка 20 скважин, каждая глубиной 1525 м при стоимости 65,57 долл./м	2 000 000
Неудачные скважины 6100 м при стоимости 49,18 долл./м	300 000
Специальный трубопровод 30 000 м при стоимости 72,13 долл./м	2 200 000
Непредвиденные расходы 15%	675 000
Всего	5 175 000

Капитальные вложения в остальное оборудование оценивались, исходя из опыта Новой Зеландии (масштаб цен 1973 г.). Отметим, что все стоимости выше, чем у существующих установок на ископаемом топливе.

Статья затрат	Затраты, долл.
Здание и энергетическая установка при стоимости 49,50 долл./кВт	10 791 000
Турбина и генератор при стоимости 56,54 долл./кВт	12 325 720
Система охлаждения при стоимости 17,62 долл./кВт	3 841 160
Высоковольтная подстанция при стоимости 11,11 долл./кВт	2 421 980
Непредвиденные расходы 15%	4 406 976
Всего	33 786 839

Полная стоимость бурения 169,67 долл./м близка к стоимости бурения в Новой Зеландии, равной 167,54 долл./м в масштабе цен 1972 – 1973 гг. В табл. 6.4 приведены общие капитальные затраты. Отметим, что наибольшую неопределенность вносит стоимость трубопроводов. Однако даже если увеличить их стоимость

Таблица 6.4

Сводка капитальных затрат [1]

Статья затрат	Затраты, долл.
Бурение	5 175 000
Энергетическая установка, здание и высоковольтная подстанция	15 194 927
Турбины, генераторы и система охлаждения	18 591 912
Общая стоимость	38 961 839 (~40 000 000)
Капитальные затраты на 1 кВт	180

в пять раз, капитальные затраты возрастут всего лишь до 214 долл./кВт и будут ниже, чем у существующих систем. Все капитальные затраты на строительство включают плату за архитектурную и инженерную разработки, землю, коммунальные и другие услуги.

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ РАСХОДЫ

Оценка эксплуатационных расходов геотермальной станции проводилась с использованием данных по эксплуатации предприятий химической промышленности. Эти цифры были увеличены на предполагаемую стоимость технического обслуживания скважин. Срок эксплуатации скважины принимался равным 20 годам, но эксплуатационный трубопровод предполагалось заменять каждые 5 лет. Чтобы усреднить эти затраты, была определена ежегодная эксплуатационная стоимость в сумме 20% от начальных капитальных вложений на эксплуатационный трубопровод.

Годовая стоимость технического обслуживания и ремонта определялась в 1% от первоначальных капитальных вложений для энергетической установки, здания, а также подстанции и в 5% для агрегатов, подверженных коррозии: турбин, генераторов и системы охлаждения. Чтобы оценить стоимость рабочей силы и надзора, предполагалось, что в каждую рабочую смену каждого рабочего дня заняты два оператора, а также два сменных мастера.

Были учтены 30%-ные затраты на надзор. Налоги штата и местные налоги исчислялись в размере 5% от суммы, подлежащей налогообложению, которая оценивалась в 25% капитальной стоимости всего предприятия с учетом амортизации. Сумма налогов указана в итоговой таблице затрат и составляет для среднего года 0,625% от

Таблица 6.5

Годовые эксплуатационные расходы [1]

Статья расхода	Расходы, долл.
Обслуживание эксплуатационных скважин	506 000
Обслуживание энергетической установки, здания и подстанции	151 949
Обслуживание турбин, генераторов и системы охлаждения	929 596
Стоимость рабочей силы и надзора	190 362
Налоги штатов и местные налоги	243 511
Страхование	389 618
Непредвиденные расходы 30%	723 310
Всего	3 134 348 (~3 000 000)

первоначальных капитальных затрат. Сумма страхования указана в размере 1% от начальных капитальных затрат. Из-за неточности оценок расходов на обслуживание и эксплуатацию включены непредвиденные расходы в размере 30%. В стоимость обслуживания включены расходы на административный аппарат. В табл. 6.5 представлены все эти эксплуатационные расходы.

ОБОРОТ КАПИТАЛА И РЕНТАБЕЛЬНОСТЬ

Существует ряд неопределенных показателей, которые препятствуют строгому анализу оборота капитала. К ним относятся арендная плата за использование недр, поправка на истощение запасов, регулируемая допустимая норма прибыли, способ финансирования, общая структура налогов для исчисления федерального подоходного налога. В примере, приведенном ниже, при коэффициенте использования 80% без учета будущих юридических и регулирующих мер принято: арендная плата 12,5% плюс 5% от общей стоимости сбыта; внутреннее финансирование; внутренняя норма прибыли, рассчитываемая в функции продажной цены электроэнергии.

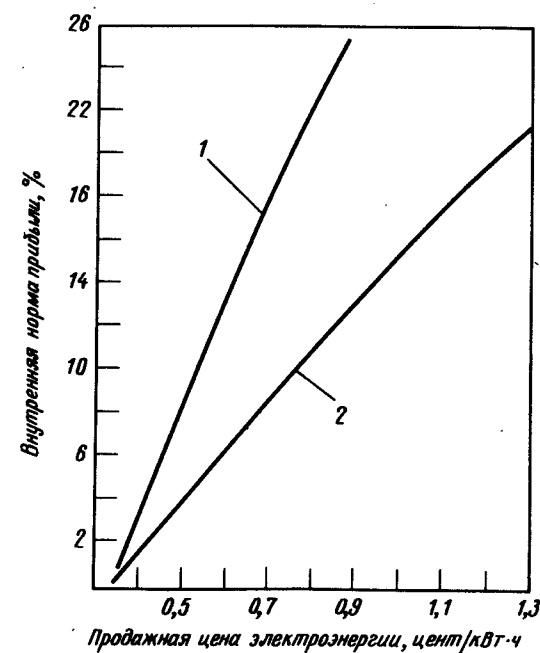
В табл. 6.6 приведен пример, в котором принято: цена на энергию 0,6 цент/кВт·ч, арендная плата 12,5% (истощение запасов не учитывается), федеральный подоходный налог 48%.

На фиг. 6.15 показана норма прибыли на капиталовложения при различных ценах на электроэнергию. Верхняя кривая рассчитана

Таблица 6.6

Оборот капитала [1]

Сбыт энергии 0,6 цент/кВт·ч	Долл. 9 180 000
Арендная плата 12,5%	1 147 500
Эксплуатационные расходы	3 134 347
Общий доход	4 696 153
Амортизация	1 946 092
Чистый доход до уплаты федерального подоходного налога	2 950 061
Федеральный подоходный налог	1 416 029
Чистый доход после уплаты налогов	1 534 032
Полный оборот капитала	3 462 124
Срок обращения капиталовложений	11,9 лет
Внутренняя норма прибыли	6,4%



Фиг. 6.15. Внутренняя норма прибыли при различных ценах на энергию [1].
1 — арендная плата 5% без учета подоходного налога; 2 — арендная плата 12,5%, подоходный налог 48% (без учета истощения запасов месторождения).

при арендной плате 5% без учета федерального подоходного налога. Нижняя — при арендной плате 12,5%, и федеральном подоходном налоге 48% без учета истощения запасов. Действительная кривая должна лежать где-то между этими кривыми. Амортизация зависит от времени линейно, причем срок полной амортизации капиталовложений и установки предполагался равным 20 годам; никаких возместимых сумм к концу 20-го года не остается.

Как видно из фиг. 6.15, при цене электроэнергии 0,32 цент/кВт·ч вкладчик не получает прибыли на капитал, а при цене выше 0,65 цент/кВт·ч и при банковском проценте, равном 7,5, капиталовложения обеспечивают превышение над банковскими процентами.

Норма прибыли не столь уж чувствительна к величине арендной платы. Например, при изменении арендной платы от 5 до 12,5% норма прибыли при продажной цене электроэнергии 0,8 цент/кВт·ч возрастает от 11 до 12,5%. При той же цене на энергию исключение федерального подоходного налога увеличивает внутреннюю норму прибыли с 11 до 19%; если допустить истощение запасов, составляющее 22%, то норма прибыли увеличилась бы с 11 до 14,5%.

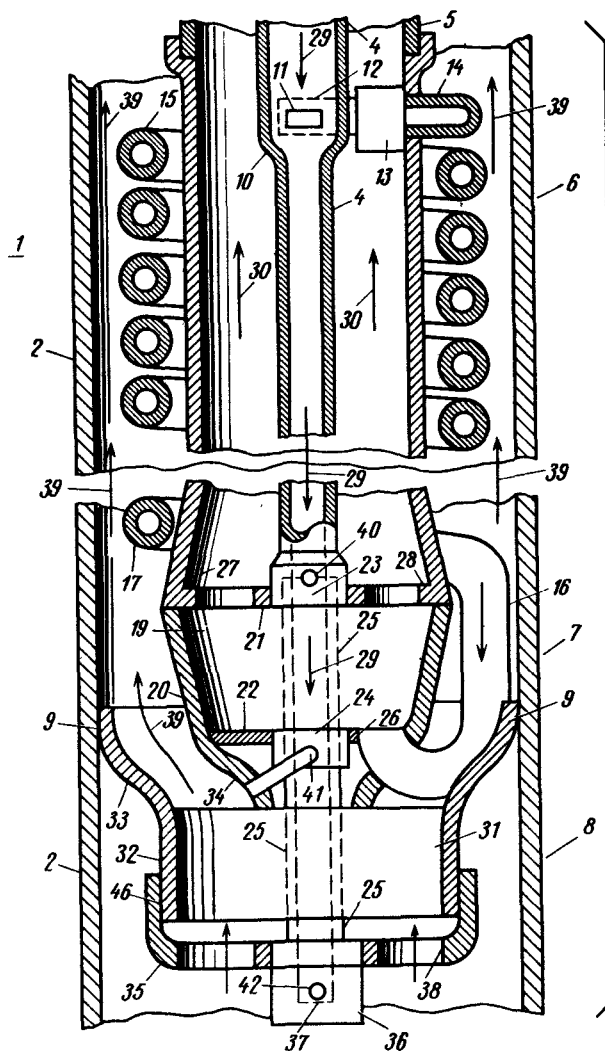
С учетом этих расчетов и в предположении, что амортизация определяется линейной зависимостью, а непредвиденные расходы многочисленны, можно сказать, что разработка геотермальной энергетической системы позволит вкладчику капитала получить доход, соизмеримый с риском. Норма прибыли при этом конкурирует с прибылью обычных тепловых и атомных энергетических систем.

Если будут разрабатываться все ресурсы, налоги штата и местные налоги достигнут 100 млн. долл. в год, а федеральные налоги будут в 10 раз больше. Эти цифры дают представление о значительном доходе для всего общества.

Метод фирмы "Спэрри рэнд"

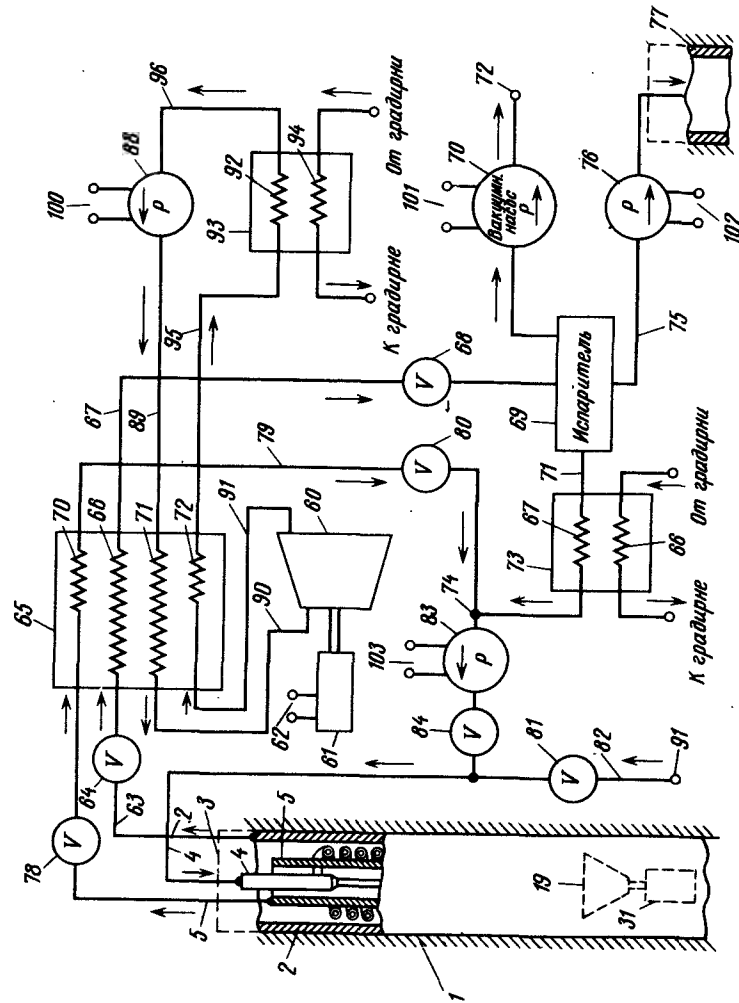
Фирма "Спэрри Рэнд" предлагает метод эффективного преобразования энергии геотермальных источников в электроэнергию путем генерации сухого перегретого пара и последующей откачки подземным оборудованием на поверхность земли перегретой воды под высоким давлением.

На фиг. 6.16 показана конструкция установки 1 геотермальной энергетической системы, представленной на фиг. 6.17. Эта установка размещается в скважине на большой глубине. Условия на этой глубине позволяют подавать на поверхность в большом количестве очень



Фиг. 6.16. Подземная насосная установка [5].

горячую воду под высоким давлением. Данная конструкция размещается внутри обычной обсадной трубы скважины 2.



Фиг. 6.17. Наземная энергетическая система [5].
V — клапан; P — пилотный насос.

Обсадные трубы 2, идущие вниз от устья скважины 3 (фиг. 6.17), concentрически охватывают внутренний трубопровод 4, изготовленный из нержавеющей стали или другого высококачественного стального сплава. По этому трубопроводу подается холодная и относительно чистая вода на забой скважины.

Внутри обсадной трубы 2 расположен второй внутренний трубопровод 5, изготовленный из того же материала, что и трубопровод 4, но большего диаметра. Он идет от устья скважины 3 до оборудования энергетической системы, размещенного на дне скважины, и используется для вывода на поверхность отработанного пара из турбины.

Установка для извлечения геотермальной энергии 1 состоит из парогенератора 6, паровой турбины или другого ротационного двигателя 7, и ротационного насоса горячей воды 8, приводимого в движение ротационным двигателем.

Эти три агрегата подвешены в донной части скважины внутри обсадной трубы 2, причем они частично опираются на внутреннюю стенку трубы 2 в районе сварного соединения 9 и поддерживаются concentрическими трубами 4 и 5. Можно использовать дополнительные средства для поддержания или обеспечения соосности.

Вниз по трубе 4 от наземной установки к сужению 10 (фиг. 6.16) закачивается чистая холодная вода. В верхней части сужения 10 имеется одно или несколько отверстий 11, подводящих воду через патрубки 12 к обычному регулятору давления и редуктору 13.

Размеры отверстий 11, характеристики регулятора давления и редуктора 13, а также действующее в трубе 4 давление чистой воды подобраны таким образом, чтобы вода протекла через трубу 14 в парогенератор без обратного тока пара. Из регулятора давления и редуктора 13, расположенных между трубами 4 и 5, вода через трубу 14 попадает в длинный теплообменник 15 из стального сплава, имеющий вид змеевика, размещенного между трубами 2 и 5.

Горячая вода, поднимающаяся вверх между трубами 2 и 5, превращает воду в змеевике 15 в высокотемпературный сухой пар. На входе в регулятор давления и редуктор 13 чистая холодная вода находится под большим гидростатическим давлением. Это давление значительно понижается редуктором 13, так что вода из скважины может перегреваться и испарять чистую воду. Полученный пар поступает в трубу 16, которая отходит вниз от последнего витка 17 змеевика 15 парогенератора 6 и проходит вблизи внутренней стенки трубы 2. В окрестности витка 17 и трубы 16 труба 5 увеличивается в диаметре и образует секцию, соизмеримую с размерами паровой турбины 19.

Паровая турбина 19 заключена внутри кожуха 20 из стального сплава в форме усеченного конуса между двумя торцевыми круглыми стальными перегородками 21 и 22. Опорные подшипники 23 и 24 с водяной смазкой, установленные в центре перегородок 21 и 22 поддерживают главный вал 25 турбины 19.

Кожух 20 и перегородки 21 и 22 жестко соединены сваркой и являются несущей конструкцией турбины 19. Паропровод высокого давления 16 подходит к входному отсеку турбины 19 через отверстие 26 в нижней перегородке 22. В верхней перегородке 21 имеется ряд отверстий 27 и 28 для выхода использованного пара из турбины 19 в пространство между трубами 4 и 5.

Таким образом, относительно чистая вода, поступающая вниз в направлении стрелки 29 по трубе 4, может после превращения в пар уже в виде частично отработанного сухого пара подниматься к устью скважины в направлении стрелки 30 в кольцевом пространстве между трубами 4 и 5.

Насос 31 расположен внутри цилиндрического корпуса 32, концентрично размещенного внутри трубы 2. Верхняя часть корпуса 32 постепенно расширяется и образует коническую секцию 33. Верхняя часть приварена в сечении 9 к внутренней поверхности трубы 2. Продолженная вниз коническая часть кожуха 20 имеет форму колокола 34. Секции 33 и 34 имеют в основном одинаковую кривизну, образуя кольцевое пространство для протока жидкости.

Насос 31 поддерживается в корпусе 32 стальной торцевой крышкой 35, приваренной к корпусу 32 по кольцевой поверхности 46. В центре крышки 35 установлен упорный подшипник 36 для поддержания конца 37 вала 25. Подшипники с водяной смазкой 24 и 36 могут одновременно поддерживать вал 25 и рабочее колесо водяного насоса 31.

В крышке 35 имеется кольцевой ряд отверстий 38, через которые горячая вода поступает в насос 31. Здесь вода ускоряется рабочим колесом насоса и выходит в кольцевое пространство, образованное концентрическими секциями 33 и 34, по которому она нагнетается вверх к устью скважины в направлении стрелки 39.

Размеры отверстия 11, характеристики регулятора давления 13 и давление холодной воды в верхней части скважины подбираются таким образом, чтобы обеспечить подачу воды для смазки подшипников 23, 24 и 36 через сужение 10 вниз по трубе 4. В этих подшипниках вода проходит между поверхностями трения, предотвращая их соприкосновение и выполняя роль смазки. Из подшипников вода выходит через отверстия 40 и 42.

Выходящая из отверстия 40 вода находится под достаточным давлением и может попасть в выходящий из турбины 19 пар, но поскольку объем ее мал, то влияние ее незначительно. Вода из отверстия 41 просто вытекает в поток горячей воды, поднимающийся в направлении стрелки 39. Вода из отверстия 42 попадает в горячую воду, прокачиваемую насосом 31.

В каждом случае давление чистой воды, используемой в качестве смазки, таково, что нежелательные обратные токи предотвращаются. Например, давления чистой воды 42 достаточно для того, чтобы загрязненная вода из скважины не проникала в подшипник 36. Так как при работе турбины 19 и насоса 31 возможны вертикальные смещения общего вала 25, подшипники 23 и 36 должны обеспечивать соосность и воспринимать осевое давление. Можно сконструировать такие подшипники, в которых гидростатическое осевое давление в зазоре с жидкостью в основном будет уравновешено.

Назначение оборудования глубокой скважины (фиг. 6.16) — обеспечить производство электроэнергии на наземной установке, состоящей из паровой турбины 60 и генератора переменного тока 61 (фиг. 7.17), которые желательно установить на уровне земли. Горячая вода, выведенная на поверхность по трубе 5 и ее продолжению (труба 63), подается через нормально открытый клапан 64 к элементу 66 обычного бойлерного теплообменника 65. Теплообменник 65, выполненный в виде обычного закрытого бака, обеспечивает теплообмен между несколькими элементами 66, 70 — 72, заключенными внутри него. Элементы могут иметь форму прямых труб или змеевиков. Теплообмен происходит путем теплопроводности через металлические стенки и промежуточную жидкость.

Основным источником энергии, подводимой к теплообменнику 65, является горячая вода, поступающая по трубе 63. Имеющая более низкую температуру, горячая вода на выходе из теплообменника поступает через трубу 67 и нормально открытый клапан 68 в испаритель 69. Клапан 68 может быть дроссельным и обеспечивать понижение давления протекающей через него жидкости с тем, чтобы жидкость легко испарялась при низких температурах, поступая в испаритель 69.

Испаритель обычного типа 69 соединен с обычным вакуумным насосом 70, который значительно понижает давление в испарителе, вызывая вскипание воды. Пар выпускается через выхлопной патрубок 71. Вакуумный насос 70 служит для откачки наиболее летучих газов через патрубок 72, чтобы они не попали в конденсатор 73,

поскольку некоторые из этих газов являются коррозионно-активными. Ценные газы, такие, как гелий и другие благородные газы, можно при желании использовать.

Испаритель 69 выполняет две функции. В нем производится чистый пар, который конденсируется в обычном конденсаторе 73 и затем в виде воды поступает в тройник 74, поддерживая расход чистой воды, закачиваемой в скважину. Другая, основная, часть воды, первоначально поступающая по трубе 5, возвращается через трубу 75 и насос 76 в скважину, закрепленную обсадной трубой 77. Таким образом, основная часть растворенных минеральных солей, извлеченных на поверхность в виде горячего водного раствора по трубе 5, возвращается насосом 76 в землю. Скважина, обсаженная трубой 77, может находиться на некотором расстоянии от скважины с тепловой системой 1 и обслуживать несколько таких систем. Жидкость может закачиваться на глубину, отличную от глубины эксплуатационной скважины.

Вторым источником энергии, подводимой к теплообменнику 65, является пар, выведенный из подземной турбины по трубе 5. Этот пар проходит через нормально открытый клапан 78 в элемент 70 теплообменника 65. Элемент 70 расположен в самой холодной части теплообменника (вблизи входа холодной чистой воды в элемент 71).

Таким образом, отработанный пар из трубы 5 в основном конденсируется в теплообменном элементе 70 и конденсат подается через трубу 79 и нормально открытый клапан 80 в тройник 74, откуда направляется в трубу 4. При закрытом клапане 81 в линии 82 вода из тройника 74 подается обычным питательным насосом 83 через нормально открытый клапан 84 и трубу 85 в трубу 4. Вблизи тройника 74 можно установить резервный бак, чтобы в случае перебоев в подаче чистой воды в трубу 4 компенсировать ее недостачу. Такую воду можно также подавать от любого доступного источника через патрубок 91 и клапан 81. Конденсатор 73 может охлаждаться водой, которая подается из градирни (не показана) к элементу 86 конденсатора 73. Элемент 87 можно охлаждать потоком воздуха.

К элементу 71 теплообменника 65 обыкновенным питательным насосом 88 через трубу 89 подается жидкость. Направление ее потока противоположно направлению потока тепла в элементах 66, 70 и 72. Жидкость испаряется и образует высокотемпературный пар, который через трубу 90 подводится к входной ступени турбины 60.

Отработанный пар поступает по трубе 91 в бойлерный теплообменник 65, где часть его оставшейся тепловой энергии отбирается около входного участка элемента 71. Затем пар подается в обычный

конденсатор 93, содержащий теплообменные элементы 92 и 94, а конденсат подводится по трубе 96 к питательному насосу 88.

Конденсатор 93 можно охлаждать потоком воды из градирни (не показана) через теплообменный элемент 94 или воздухом. Для производства высокотемпературного пара в теплообменнике 65 можно использовать жидкость вроде воды или какие-либо органические жидкости, которые являются более подходящими для цикла Ренкина.

Литература

1. Austin A.L., Higgins G.H., Howard J.H., The Total Flow Concept for Recovery of Energy from Geothermal Hot Brine Deposits, University of California's Lawrence Livermore Laboratory in UCRL-51 366, April 1973.
2. Elders W.A., Rex R.W., Meidar T., Robinson P.T., Biehler S., *Science*, 178 (4056), 20 (1972).
3. Otte C., Drilling, Production and Disposal Technology in Salton Sea Geothermal Area, Imperial County, California, Compendium of Papers, Imperial Valley-Salton Sea Area Geothermal Hearing, Sacramento 1972 (State of California, Sacramento, 1972), paper R.
4. Helgeson H.C., *Amer. J. Sci.*, 226, 129 (1968).
5. Matthews H.B., U.S. Patent, 3,824,793: July 1974.

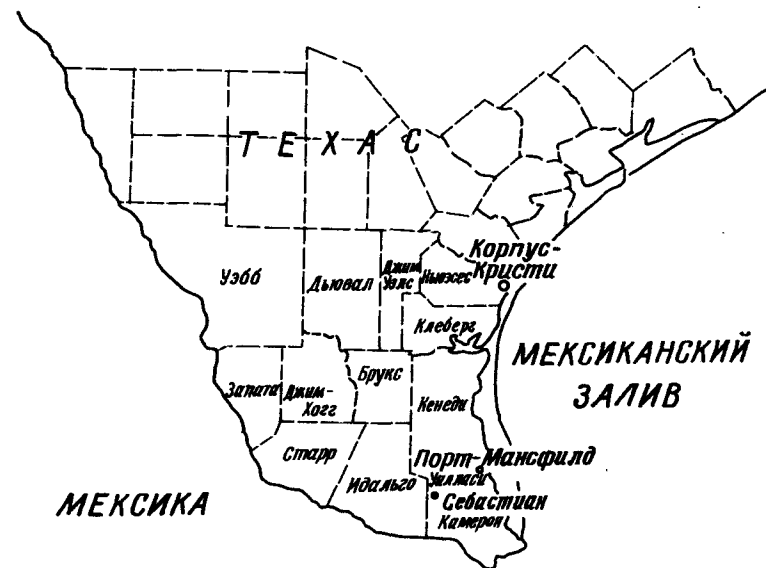
ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОСВОЕНИЯ ТРЕХ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ РАЙОНОВ США

Техас

На глубинах более 1800 – 3000 м в осадочных породах третичного возраста наблюдаются очень высокие гидростатические давления и температуры и низкие солености флюидов. Это зоны аномально высокого давления, которые распространены во всем мире и встречаются в поясах, разделенных тектоническими разломами, простираясь на сотни километров. Такая зона в северной части побережья Мексиканского залива длиной 1200 км простирается от реки Рио-Гранде в шт. Техас до Миссисипи-Саунд. Она лежит под прибрежной равниной на расстоянии 95 – 160 км от берега и под континентальным шельфом примерно в 240 км от берега.

Находящиеся под высоким гидростатическим давлением глубинные воды в районе Мексиканского залива и в аналогичных бассейнах третичного возраста во всем мире являются потенциальным источником электрической энергии. В настоящем разделе книги использованы данные исследования [1], проведенного с целью выявления возможности сооружения опытной установки на побережье Мексиканского залива в шт. Техас, в которую будет поступать вода из водоносных слоев с высоким давлением, обеспечивая преобразование тепловой и механической энергии в электрическую.

Для предполагаемого сооружения установки выбраны три участка в южной части шт. Техас: Себастиан в северо-западной части графства Камерон, Порт-Мансфилд в восточной части графства Уилласи и Корпус-Кристи (фиг. 7.1). Профили нефтяных глубоких скважин в этих районах были тщательно изучены с целью определения изменений давления, температуры и солености по глубине. Проведенный анализ показал, что на глубине в районах Себастиана и Порт-Мансфилда находятся мощные водоносные пласты. На глубинах ~4600 м эти пласты имеют температуру выше 149° С, давления более 69 МПа и соленость менее 20 г/л. Проходящими здесь разломами



Фиг. 7.1. Карта побережья Мексиканского залива, шт. Техас [1].

каждый из этих районов выделяется в отдельный структурный блок с размерами, превышающими 770 км².

Изучение вопросов, связанных с возможным загрязнением окружающей среды в районах Себастиана и Порт-Мансфилда, показало, что сооружение опытной установки и ее работа в течение 5 лет не вызовет здесь заметного загрязнения.

В результате было решено соорудить опытную ГеоТЭС, работающую от одной скважины в южной части шт. Техас. От этой скважины можно получать более 4 МВт электрической мощности и в качестве побочного продукта – 5,7 млн. м³ метана в год. Изучение геологии и рассмотрение вопросов защиты окружающей среды показывают, что установку можно построить как в Себастиане, так и в Порт-Мансфилде.

МЕСТОРОЖДЕНИЯ С АНОМАЛЬНО ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ

В бассейнах третичного возраста (менее 80 млн. лет), заполненных обломочными отложениями (песок, глина или аргиллит), породы на глубинах более 1800 – 3000 м обычно недоуплотнены. Давление внутривещной жидкости частично противодействует давлению верх-

них покрывающих пластов, и в таком случае говорят, что месторождение находится под геостатическим давлением. Системы водоносных пластов внутри такого находящегося под высоким давлением участка разделяются разломами на блоки и занимают площади от десятков до сотен квадратных километров. Залегающие между пластами глина или аргиллит (глинистый сланец) обычно имеют пористость, на 6–8% превышающую пористость полностью уплотненной породы на таких же глубинах.

Отношение давления жидкости к давлению покрывающих пластов обычно составляет в зоне высокого давления, распространяющейся вниз до зоны метаморфизма, 0,7–0,9. Зоны высокого давления пронизаны тысячами пор и более нагреты, чем области с нормальными давлениями, так как в течение миллионов лет содержащиеся в них воды не были связаны с поверхностью. Вода является плохим проводником тепла (ее теплопроводность составляет примерно 0,2 от теплопроводности породы), а недоуплотненная глина представляет собой очень хороший теплоизолятор. Кроме того, удельная теплоемкость воды в ~5 раз превышает теплоемкость породы. Таким образом, месторождения высокого давления имеют значительно меньший тепловой поток к поверхности и содержат большее количество тепла.

Геотермический градиент резко возрастает вблизи верхней границы зоны, находящейся под геостатическим давлением (т.е. гидравлической границы), и в таких месторождениях протекают процессы, близкие к процессам, происходящим в автоклаве. Термический диagenез глины, сопровождающийся увеличением ее объема, приводит к выделению связанной и внутрикристаллической воды, количество которой может составлять до 30% первоначального объема глины. Эта вода является пресной. Попадая в прилегающие песчаные водоносные слои, она вытесняет более соленую воду вверх к границе зоны аномально высокого давления. Вода в водоносных слоях, расположенных на несколько сотен метров ниже верхней границы зоны, обычно содержит менее 10 г/л растворенных солей. В некоторых местах эта вода является питьевой (содержание солей менее 1 г/л).

Системы с песчаными водоносными слоями имеют проницаемость порядка 0,025 дарси, вязкость воды обычно составляет 0,2–0,3 мПа·с, а сама вода является хлоридно-бикарбонатной с показателем pH, равным 7,5–8,5. Так как растворимость газообразных углеводородов в воде резко возрастает с уменьшением растворенных в ней твердых веществ, а высокие температура и давление приводят к естественному крекингу нефтяных углеводородов, то в 1 л воды в

месторождениях высокого давления содержится 0,004 м³ природного газа. Растворенные газы могут оказаться ценным побочным продуктом при извлечении воды.

История освоения месторождений с аномально высоким давлением (в основном для получения природного газа) свидетельствует о том, что извлекаемая жидкость замещается водой из недоуплотненных аргиллитов, окружающих месторождение. Не существует определенной зависимости между объемом извлекаемой жидкости и результирующим давлением в месторождении. После прекращения эксплуатации происходит частичное восстановление давления. Вполне очевидно, что при извлечении воды для получения геотермальной энергии будет эффективно происходить отбор воды из недоуплотненных аргиллитов, окружающих водоносный пласт. В то же время давление в месторождении заметно падает лишь по истечении продолжительного времени такого извлечения и, конечно, при условии, что площадь месторождения не меньше нескольких сотен квадратных километров.

Температуры извлекаемой воды достигают 150–180°С, давление на устье скважин составляет 30–40 МПа, а производительность каждой скважины – несколько тысяч тонн воды в сутки.

Район западного побережья Мексиканского залива. Здесь предполагается пробурить опытную геотермальную скважину. Этот район выбран по следующим причинам: а) здесь имеются участки с развитием мощных толщ третичного возраста, аналогичных образовавшимся во многих осадочных бассейнах мира; б) в северной и западной частях прибрежной равнины Мексиканского залива интенсивно осуществлялась добыча нефти на берегу (а в последнее время и в море) и поэтому имеется много данных по глубинным параметрам; в) зоны аномально высокого давления во многом повторяют друг друга как стратиграфически, так и регионально, что упрощает задачу выбора расположения опытной установки. Полагают, что информация, полученная при изучении прибрежного района Мексиканского залива, окажется полезной при построении общей модели геотермальных месторождений аномально высокого давления.

В пределах данного района были выбраны три участка с целью определения их пригодности для бурения опытной скважины. Эти участки (Себастиан, Порт-Мансфилд и Корпус-Кристи) показаны на фиг. 7.1.

Глубинные температуры и солености в северной части графства Камерон, где расположен участок Себастиан, уже изучались Геоло-

гической службой США [2]. Установлено, что здесь очень высокие температуры и низкие солености. Графство Уилласи, в котором расположен участок Порт-Мансфилд, согласно данным этой службы, является одним из мест побережья Мексиканского залива, где изотерма с температурой 149° С очень близко подходит к поверхности земли (~3,9 км). Участок Корпус-Кристи был включен в программу исследований, поскольку проведению работ здесь могло способствовать присутствие авиабазы Военно-морских сил США.

ОЦЕНКА ГЛУБИННЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ВЫБРАННЫХ УЧАСТКОВ

Карты, на которых указаны место и общая глубина каждой нефтяной скважины вблизи Себастиана, Порт-Мансфилда и Корпус-Кристи, получены с помощью аэросъемки. Были проанализированы изменения электрических показателей по глубине всех скважин до 3 км, и по кривым изменения разности потенциалов и сопротивлений было определено расположение водоносных слоев. Данные по таким параметрам, как глубина и мощность каждого водоносного слоя, температура на забое скважин, разность потенциалов, удельный вес бурового раствора и его тип, а также обозначение слоя были записаны на перфокартах.

Специально составленная Уоллисом и Джонсом методика расчета солености также была запрограммирована. Вместе с программой расчета температуры водоносного слоя и давления в формации она была использована при обработке записанных на перфокарте данных. По полученным результатам легко выявить скважины, расположенные в водоносных пластах с высокими температурой, давлением и низкой соленостью. Значения пористости и проницаемости для этих районов были определены на основании данных, полученных с помощью керновых проб [3]. Изучение структуры расположенной здесь формации Фрио с водоносными слоями было проведено Геологической службой (Джонс, частное сообщение). Эти данные были использованы для определения тех разделенных разломами блоков, которые содержат наиболее подходящие водоносные слои, и для оценки объема последних.

На основании проведенного анализа участок Корпус-Кристи был исключен из рассмотрения. На этом участке на глубинах более ~3 км отсутствуют водоносные слои. В расположенных на глубинах 2 – 3 км песчаных горизонтах формации Фрио соленость вод составляет

50 – 100 г/л, а температуры не столь высоки, как на тех же глубинах в более южных районах.

Наиболее подходящим оказался участок Себастиан. Данные по соответствующим глубинным параметрам приведены в табл. 7.1. Эти данные получены на скважине глубиной ~4,5 км, расположенной в ~1,5 км от оптимального с географической и экологической точек зрения участка. Существовала еще одна скважина, удаленная на 16 км, но расположенная в той же зоне сбросов. С помощью полученных на ней данных выявлена такая же низкая соленость и высокое давление и подтверждено, что система водоносных слоев с аномально высоким давлением распространена по всей зоне.

В табл. 7.1 также приведены данные по глубинным параметрам на участке Порт-Мансфилд. На глубине 3860 м здесь имеется песчаный горизонт с температурами ~130° С. Давление в горизонте составляет ~70 МПа, соленость ~20 г/л. На глубине 4780 м имеется целый ряд песчаных горизонтов общей мощностью 244 м; давления и температуры в них аналогичны приведенным для Себастиана, но соленость примерно в 3 – 4 раза выше.

Данные для участка Порт-Мансфилд получены на скважине глубиной 4910 м. Скважина близка к выбранному месту (26°29'00" с.ш.

Таблица 7.1

Глубинные параметры на участках Себастиан и Порт-Мансфилд [1]

Показатели	Себастиан	Порт-Мансфилд
Примерная глубина до водоносных слоев, испытывающих действие высокого давления, м	4350	3370 – 4780
Мощность водоносных слоев, м	215	244
Уточненная температура, °С	160 – 163	130 – 165
Давление, МПа	60	69 – 99
Соленость, г/л	2 – 6	20
Длина блока, содержащего водоносные слои, км	15 – 50	15 – 50
Наличие низкой солености и аномально высокого давления по всей зоне	Да	Да
Пористость водоносных слоев, %	20	20
Проницаемость водоносных слоев, дарси	0,1 – 0,135	0,1 – 0,135

и $97^{\circ}30'45''$ в.д.), также попадает в зону аномально высокого давления и находится в ~ 24 км западнее выбранного места. Скважины глубиной 3 – 4 км; расположенные намного ближе, в зону высокого давления не попали.

ОПИСАНИЕ УЧАСТКА СЕБАСТИАН

Расположение. Участок Себастиан расположен в нижнем течении реки Рио-Гранде в Техасе, в крайнем северо-западном углу графства Камерон, и имеет координаты $26^{\circ}19'$ с.ш. и $97^{\circ}50'$ в.д. Участок, земли которого в настоящее время используются для выращивания хлопка, находится непосредственно к северу от дамбы, ограждающей реку Рио-Гранде, и примерно западнее участка Лангория Лас-Паломас-ского заповедника, занимающего площадь ~ 80 га.

Ближайшим населенным пунктом здесь является город Харлингген (41 тыс. жителей). Он расположен в 22 км юго-восточнее участка Себастиан и связан с ним дорогами, находящимися в хорошем состоянии. В радиусе 8 км от участка имеется ряд небольших населенных пунктов, из которых ближайший поселок Себастиан (~ 1000 жителей), расположен на 5 км севернее, и поселок Санта-Роза (1500 жителей) – на 6 км южнее. Имеются также несколько других поселков в радиусе 8 км, к которым ведут асфальтированные дороги. Участок Себастиан расположен в 38 км на запад от северного заповедника Лагуна-Атакоза.

Гидрогеологические условия. Вблизи участка Себастиан обнаружены два источника подземных вод, которые можно использовать для ирригации, для коммунального водоснабжения и в промышленности: бассейн подземных вод в нижней по течению части реки Рио-Гранде и неглубоко залегающие подземные воды в Мерседес-Себастиане.

Первый из них занимает юго-восточную часть графства Старр, южную часть графства Идальго, западную часть графства Камерон и небольшую юго-западную часть графства Уилласи. Его площадь 2980 км^2 , из которых 2460 км^2 являются продуктивными. Бассейн образован рядом водоносных слоев, относящихся к формациям Голиад, Лиззи и Бьюмонт, а также к аллювиальной формации Пост-Бьюмонт. Проницаемые слои гидравлически связаны в единое целое. Однако в отдельных местах они разделяются менее проницаемыми слоями.

Основные границы этого бассейна в северо-восточном и восточном направлениях определяются пригодностью воды для ирригации и промышленного использования. В юго-восточной части графства Идальго и в западной части графства Камерон неглубоко залегающие водоносные горизонты на основании химического состава подземных вод выделяются в самостоятельный бассейн Мерседес–Себастиан.

Максимальная мощность водоносных слоев основного бассейна составляет ~ 210 м. Однако она сильно меняется и в среднем не превышает 150 м. Содержание в воде растворенных солей возрастает с ростом глубины. Поэтому для большинства применений нижняя допустимая граница месторождения может быть установлена только на основании химического состава воды. Лучшая по качеству вода в этом месторождении находится вблизи реки Рио-Гранде, а с удалением от реки на север ее качество ухудшается.

Вода в верхней части бассейна Рио-Гранде обычно относится к грунтовым водам со свободной поверхностью. Однако при движении вниз и в горизонтальном направлении вода может попасть под относительно менее проницаемые породы и таким образом на локальных участках приобрести напор, как, например, в районе города Харлинггена.

По-видимому, вода поступает в бассейн в основном путем просачивания с поверхности земли в количестве, зависящем от интенсивности выпадающих осадков и достигающем максимума в периоды наиболее сильных дождей. До освоения большой расход воды из бассейна происходил за счет испарения. Но после того, как земля стала возделываться, эта часть расхода уменьшилась.

Во время сильных осадков, сопровождающих ураганы, бассейн может быть почти полностью заполнен, что может привести к пропитыванию водой почвенного слоя. Но количество запасаемой при этом воды невелико по сравнению с общим ее расходом через скважины. Во время продолжительных периодов незначительных осадков, когда расход выкачиваемой воды максимален, а поступление минимально, количество запасенной воды иссякает в сравнительно короткий срок.

Вокруг участка Себастиан было пробурено несколько скважин на глубины 90 – 120 м. Семь скважин в пределах радиуса $\sim 1,5$ км от поселка давали воду для ирригации земельных участков площадью 20 – 120 га. Скважины работали в 50-х годах. Уровень воды в скважинах за первые годы понизился, но затем в период 1957 – 1959 гг. быстро поднялся и во многих местах находился на глубине всего 1,5 м.

Общее содержание растворенных в воде солей составляло 30 – 40 г/л. Министерство сельского хозяйства США классифицировало эту воду как высокощелочную и не пригодную для ирригации при обычных условиях. Содержание бора в воде 20 – 80 мг/л превышает предельно допустимую величину 37, 5 мг/л для проведения ирригации.

Вода из неглубоко залегающих водоносных слоев бассейна Мерседес – Себастиан содержит значительно меньше растворенных солей, чем вода из более глубокого бассейна Рио-Гранде. Бассейн Мерседес – Себастиан сложен из проницаемых отложений, залегающих на глубинах менее 30 м от поверхности, приурочен к затопляемой при паводках равнине Мерседес – Реймондвилл и примыкает к формации Бьюмонт. Бассейн прослеживается в юго-восточной части графства Идальго, в западной части графства Камерон и в юго-западной части графства Уилласи, но его границы в последнем случае не выявлены и установлены лишь по качеству воды из имеющихся там скважин.

Вода из неглубоких скважин в окрестности участка Себастиан значительно менее соленая, чем вода из более глубоких скважин, и это указывает на поступление свежей воды из неглубоко залегающего бассейна Мерседес – Себастиан. Как указывалось, Министерство сельского хозяйства классифицировало большую часть воды этого бассейна как очень соленую и непригодную для ирригации при обычных условиях. Площади, непосредственно примыкающие к данному участку, также были классифицированы как имеющие очень соленую воду, которую нельзя использовать на почвах с ограниченным дренажом.

Относительное содержание натрия в водах вблизи участка оказалось низким, а сами воды – низкощелочными и малоопасными. Концентрация растворенных нитратов максимальная для всего бассейна, что может быть связано с наличием бактерий.

Дебит отдельных скважин, питаемых бассейном Мерседес – Себастиан, невысок; вода используется для коммунальных нужд, для ирригации и на животноводческих фермах, причем вблизи выбранного участка воды для ирригации не используются.

Использование земель. Место, где предполагается сооружение ГеоТЭС, в настоящее время является хлопководческим районом. Здесь получают хорошие урожаи без ирригации. На расстоянии ~1 км на восток от места возможного сооружения ГеоТЭС находится заповедник Лангория-Юнит.

Место предполагаемого бассейна для охлаждения является впадиной, примыкающей к северной дамбе протока. Земли в этой впадине или низине не возделывались из-за плохих условий дренажа, и сейчас здесь произрастают травы и кустарник.

Северный проток имеет ширину ~800 м и искусственные дамбы, которые на ~3 м возвышаются над поверхностью земли. Регулирующий канал, расположенный между двумя дамбами, был прорыт для удаления избыточных вод с окружающих полей. Этот канал имеет пропускную способность 34 – 42,5 м³/с. Проток предназначен для принятия избыточных вод из реки Рио-Гранде и для исключения возможного затопления дельты реки. Вход в протоки обеспечивается двумя проходами через дамбу, расположенными непосредственно выше и ниже Анзалдус-Дэм. Максимальная пропускная способность протока 2100 м³/с. Однако сужение протока в месте пересечения с каналом Уилласи-кэнал-сифон, расположенное на 1,25 км вниз по протоку от места предполагаемого сооружения водоема для охлаждения, несколько снижает указанную пропускную способность.

Еще до сооружения протоков правительство США приняло решение провести все строительные работы за счет графств, через которые они проходят. Это позволяет брать у них материалы для строительства, а также использовать их земли для сброса избыточных вод или вод при осушении. В результате протоки по предписанию правительства находятся в частном владении.

За исключением места, непосредственно примыкающего к каналу Уилласи-кэнал-сифон, владельцы протоков возделывают эти земли в соответствии с установленными правилами. На большей части территории здесь получают хлопок. Хотя и существует риск наводнения, его вероятность уменьшилась, так как емкость водохранилища вверх по потоку возросла.

Протоки проходят через лучшие осушенные сельскохозяйственные земли в дельте реки, поскольку они являются единственным дренажным каналом, удаленным от реки Рио-Гранде. Новые сооружения могут создаваться лишь по разрешению Международной комиссии по водным ресурсам и границам, должны быть передвижными, а по площади занимать не более 20,8 м².

На используемых землях в соседнем районе расположены два кладбища: Эль-Азадан в 1,25 км восточнее предполагаемого бассейна для охлаждения и Санта-Рита в 1,6 км севернее места предполагаемого сооружения ГеоТЭС. Южнее протока сооружена сеть

ирригационных и дренажных канав, а земля между протоком и городом Санта-Роза используется для поливного земледелия, и здесь имеется немногочисленное население. К северу от места предполагаемого сооружения ГеоТЭС для ирригационных целей используется вода из скважин.

На несколько большем удалении, в пределах 16 км, имеется несколько небольших населенных пунктов. В 10 км на юго-восток расположено нефтяное месторождение Лейси-Мерседес с весьма ограниченным дебитом.

ВЛИЯНИЕ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Выброс из скважины. Выброс из скважины во время бурения мог бы значительно повлиять почти на всю окружающую природу вблизи этой скважины. Однако значительный опыт буровых работ в зонах с высоким гидростатическим давлением, приобретенный в последние годы, позволил успешно пробурить скважины в непосредственной близости от места сооружения установки. Современные методы бурения позволяют свести вероятность выброса к минимуму.

Влияние на водоносные слои. При использовании методов бурения и обсадки, разработанных при добыче нефти, загрязнения слоев пресной воды во время бурения не произойдет. Закачка использованных вод в водоносные слои на глубины 1500 – 1800 м, на которых подземные воды являются обычно очень солеными, обеспечит их опреснение.

Вблизи места бурения скважины будет сооружен специальный облицованный резервуар для сбора воды при случайном выбросе. Выброшенная вода несомненно будет очень горячей, а возможно и соленой. Если бы такая вода содержалась не в облицованном резервуаре продолжительное время, она могла бы оказать загрязняющее влияние на грунтовые воды, залегающие неглубоко от поверхности. Вода попадает в резервуар только при случайных выбросах и содержится в нем до охлаждения, после чего спускается в северный проток и Мексиканский залив.

Шум. Максимальный шум имеет место при бурении, когда работает дизель. После завершения бурения единственным источником шума будет большая турбина. Сбравливания газов в атмосферу производиться не будет, т.е. будет отсутствовать типичный для обычных электростанций источник шума и загрязнения атмосферы.

Влияние на морскую воду. Вода, которая будет сбрасываться в северный проток и лагуну Мадре будет охлаждаться в сборном баке, т.е. вредное влияние на жизнь морских растений и животных будет исключено. Соленость воды в лагуне Мадре составляет 35 – 100 г/л, т.е. практически любая поступающая в нее вода будет менее соленой.

Опускание поверхности. Извлечение воды только из одной скважины за период более пяти лет может привести к некоторому оседанию почвы. Однако побережье Мексиканского залива находится в несейсмической зоне, и поэтому ни оседание, ни закачка воды в пласт не могут вызвать здесь землетрясения.

Использование земель. Земли, включающие участок Себастиан, в настоящее время возделываются. В случае прекращения сельскохозяйственного использования и сооружения опытной установки никаких помех для существующей транспортной сети, систем коммунальных предприятий, жилищных сооружений и мест отдыха не предвидится.

ОПИСАНИЕ УЧАСТКА ПОРТ-МАНСФИЛД (РАЙОН ТЭНЕРИАС)

Расположение. Район Тэнериас расположен в восточной части графства Уилласи приблизительно в 10 км от лагуны Мадре и имеет координаты 26°29' с.ш. и 97°30'45" в.д. Участок находится в 6 км на восток от небольшой фермы Эль-Соц. В 16 км на юго-восток граница заповедника Лагуна-Атакоза, и в 5 км на юго-запад – месторождение нефти Уилламар. В нескольких километрах севернее участка проходит асфальтированное шоссе, которое ведет к двум небольшим поселкам: Сан-Перлита (348 жителей) и Порт-мансфилд (200 жителей). Первый из них расположен на 1,2 км западнее, а второй – на 1,1 км северо-восточнее залива лагуна Мадре. Самым большим городом в графстве Уилласи является Реймондвилл (8000 жителей), расположенный в 25 м на запад от шоссе.

Гидрогеологические условия. Уровень подземных вод в районе Тэнериас очень близок к поверхности. В расположенном вниз по течению реки Рио-Гранде районе Ломальто с почвой из жирных суглинков этот уровень во время сильных осадков находится на глубине менее 0,6 м, и во впадинах образуются озера. Вода здесь очень соленая с высоким содержанием бора и натрия. На несколько большей глубине расположен уровень грунтовых вод в районе Виктория. Вода здесь также очень соленая и непригодна ни для питья, ни для сельскохозяйственных целей.

Воду для обеспечения нужд животноводческих ферм извлекают из песчаных горизонтов плиоценового возраста, состоящих в основном из глины и песков и залегающих на глубинах 400 – 500 м. Общее содержание растворенных солей в воде достигает 5 г/л вблизи Сан-Перлита, расположенного на несколько километров западнее, и до 10 г/л в самом Порт-Мансфилде. Содержание бора составляет 6,5 – 11 мг/л. Вода имеет очень высокую соленость и опасную концентрацию натрия. Тем не менее, воды из песчаных горизонтов формации Голиад считаются лучше вод из образований Лиззи и Бьюмонт.

Использование земель. Из-за высокой солености, а также частого изменения водного режима и почвы земля совершенно непригодна для выращивания растений. Традиционно этот район использовался для выгона скота. В последние годы эта часть фермы Эль-Соц арендуется правительством США и используется как база Военно-морских сил США по наблюдению за искусственными спутниками Земли.

В нескольких километрах на юго-запад расположено нефтяное месторождение Уилламар, имевшее максимальную продуктивность в конце 40-х и начале 50-х годов, когда оно занимало шестое место среди месторождений шт. Техас. В настоящее время его продуктивность понизилась. Восточнее находится еще одно нефтяное месторождение Соц-Ранч-Нопал. Какого-либо поселка, связанного с этими месторождениями, здесь нет, а население очень рассеяно.

К югу от месторождения Соц-Ранч-Нопал находится заповедник Лагуна-Атакоза, а в ~10 км на восток от района Тэнериас находится лагуна Мадре. Это внутреннее море играет большую роль в разведении и промысле рыбы. Порт-Мансфилд, изолированный поселок на восточном берегу лагуны, является центром рыбоводства как в лагуне, так и на побережье Мексиканского залива, поскольку он имеет выход в залив через проток Порт-Мансфилд. Население Порт-Мансфилда значительно выросло за последнее десятилетие в отличие от других поселков в графстве Уилласи, численность населения которых после 50-х годов сократилась.

География и гидрология лагуны Мадре. Лагуна Мадре является длинным узким прибрежным заливом, простирающимся от залива Корпус-Кристи на юг к дельте реки Рио-Гранде. Она заключена между берегом материка и узким песчаным наносом, известным как остров Падре. Лагуна очень мелка: средняя глубина составляет менее

1 м, а максимальная – не более 3 м. Дно лагуны имеет небольшой уклон и изобилует отмелями и углублениями. Ширина лагуны 5 – 8 км и зависит от сезонных и метеорологических условий, определяющих уровень воды.

Большая часть береговой линии периодически затопляется, и поэтому бывает трудно определить ее действительные границы. Посредине лагуны Мадре, южнее залива Баффин, находятся скопления ила и песчаные наносы, которые затопляются только при самом большом подъеме воды. Эта отмель разделяет залив на две части. Северная, или верхняя, часть лагуны Мадре рассматривается в данном разделе. В северной части лагуны, где к ней примыкает залив Корпус-Кристи, имеется длинная поперечная отмель, исключающая водный обмен с Мексиканским заливом, за исключением периодов значительного подъема воды. Практически залив Корпус-Кристи связан в лагуне Мадре только береговым каналом и узким входом на базу военных кораблей. В верхней части лагуны имеются несколько небольших, естественно образовавшихся песчаных островков, из которых самыми крупными являются Северный и Южный острова Берд-Айленд и остров Пита. Возможно, самой примечательной особенностью залива является береговой искусственный канал шириной 38 м и глубиной 3,7 м. Песок и ил из канала образовали перемычку длиной ~26 км в самой северной части залива, несколько проходов в которой обеспечивают водный обмен между восточной и западной частями лагуны. Южнее перемычки образовалось множество островков, расположенных по обе стороны канала.

Донные отложения в заливе около острова Падре в основном образованы песком, а также песком и глиной с основного материка. Волны здесь слабее из-за ограниченности пространства и небольшой глубины, а воды в основном мутные. В таких неглубоких водах из-за непрерывного взбалтывания волнами может осесть очень мало взвешенных веществ. Здесь постоянно дуют сильные ветры со средней скоростью 14 – 22 км/ч, в основном в юго-восточном направлении. Примерно 7 месяцев в году они вызывают сильное волнение поверхности в дневное время, лишь немного затихая на ночь. Вследствие преобладания юго-восточных ветров волнами разрушены главным образом западный и северо-западный берега и только здесь образованы отмели.

Течения связаны с ветрами, которые определяют морские приливы. Поэтому, когда дуют северные ветры, то течение направлено на

юг, и наоборот. В более глубоких водах были обнаружены противоположные течения.

Периодические приливы и отливы почти отсутствуют. Подъем и снижение уровня воды зависят от силы ветра, который может вызывать приливы до 1 – 1,2 м. Эти приливы непериодичны, но играют важную роль в регулировании водного обмена с Мексиканским заливом. Приливы весной и во время дождей вызывают подъем воды до 5,5 м.

Воды в заливе очень соленые. Соленость зависит от времени года, а также бывает различной в разные годы. Она изменяется также в направлении с севера на юг и зависит от метеорологических условий и количества поступающей через канал воды с материка. Соленость изменяется от 110 до 10 г/л, в среднем составляя 35 – 45 г/л.

Залив неглубокий, и поэтому температура воды в нем соответствует температуре воздуха. Это означает, что существуют значительные суточные и сезонные изменения температуры. Летом температура воды изменяется в пределах 24 – 32° С на глубинах более 0,60 м, а на более мелких местах превышает 35 °С. Суточные изменения температуры воды достигают 5 °С на больших глубинах, а на малых глубинах могут быть еще большими. Зимой холодные сильные северные ветры охлаждают воду почти до 0 °С.

Влияние на окружающую среду. Вопросы влияния на окружающую среду были рассмотрены при описании участка Себастиан. Единственным различием между участками в этом плане является расположение Порт-Мансфилда непосредственно у входа в Мексиканский залив. Поэтому слив из сборного бака здесь будет производиться непосредственно в залив, а не в проток, как это предполагается делать в Себастиане, что исключит возможность загрязнения окружающей среды.

РАСЧЕТ ДЕБИТА СКВАЖИН МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Подробные карты геологических структур и распределения отложений на Техасском побережье Мексиканского залива показывают, что область с аномально высоким гидростатическим давлением разделена на блоки тектоническими разломами и изменениями горных пород в этих заполненных водой песчаных блоках, которые целесообразно рассматривать как отдельные месторождения. Приводимые ниже расчеты относятся к модели месторождения.

Рассмотрим зону с аномально высоким давлением мощностью 1,6 км, начинающуюся на глубине 3660 м и состоящую наполовину из песчаника и наполовину из аргиллита глинистого сланца). Площадь зоны 32 × 48 км. В расчете приняты следующие основные параметры:

Радиус скважины, м	0,09
Вязкость воды, мПа·с	0,2
Пористость песчаника	0,25
Проницаемость песчаника (k), дарси	
высокая	0,3
средняя (для побережья Мексиканского залива)	0,05

При этих параметрах дебит одной скважины в данном месторождении может составить $7,95 \cdot 10^3$ т/сут. Были проведены расчеты для определения оптимального числа скважин и общего ожидаемого дебита при двух принятых значениях средней проницаемости. Результаты приведены в табл. 7.2.

В расчетах не учтено влияние расширения растворенных газов и отжатия воды из аргиллитов, которое должно приводить к увеличению дебита скважин. Следовательно, приведенные в табл. 7.2 цифры являются заниженными. Расчет тепловой энергии, извлеченной из горячей воды, проведен при начальной температуре 163 °С и конечной температуре 100 °С. Температурный перепад 63 °С должен обеспечивать 246 кДж/кг. Считая к.п.д. преобразования энергии равным 10%, получаем, что для производства 1 кВт электрической

Таблица 7.2

Дебит скважин [1]

Число лет	Дебит, 10^8 т	
	$k = 0,3$ дарси	$k = 0,05$ дарси
	190 скважин	35 скважин
1	5,66	1,02
2	10,6	1,93
5	26,1	4,55
6	41,6	7,2
10	49,1	9,1
20	96,3	17,6

мощности необходим расход воды 3,44 т/сут. Скважина с суточным дебитом $7,95 \cdot 10^3$ т горячей воды позволит тогда вырабатывать 2,5 МВт. Если пренебречь механической энергией, которую вода из скважины имеет при атмосферном давлении, то при двух заданных значениях проницаемости получаются следующие мощности:

190 скважин $k = 0,3$ дарси	475 МВт
35 скважин $k = 0,05$ дарси	88 МВт

Дополнительную мощность, составляющую ~30% от указанных величин, можно получить, если использовать энергию среднего давления горячей воды на устье скважины.

Теперь рассмотрим проблему оседания после эксплуатации установки в течение 20 лет. Расчеты проведены для худшего случая, т.е. для случая максимальной мощности при $k = 0,3$ дарси.

Общее количество воды в месторождении (при существующем давлении в месторождении) составляет $28,4 \cdot 10^{10}$ т. При геостатическом коэффициенте 0,8 давление на забое скважины будет равным 68,7 МПа. Заметим, что потребление воды в течение 20 лет ($9,85 \cdot 10^9$ т) составит ~3,5% всего ее количества. Коэффициент расширения воды равен $7,3 \cdot 10^{-10}$ Па⁻¹, а относительное уменьшение объема пор $4,37 \cdot 10^{-10}$ Па⁻¹, что дает общее снижение объема месторождения $11,68 \cdot 10^{-10}$ Па⁻¹. В предположении об отсутствии растворенных газов и отжатия воды из аргиллита (глинистого сланца) перепад давлений, необходимый для получения в течение 20 лет требуемого количества воды, составит

$$\frac{3,5 \cdot 10^{-2}}{11,68 \cdot 10^{-10}} = 30 \text{ МПа.}$$

Вначале давление на устье скважины должно составлять ~31 МПа, а через 20 лет эксплуатации оно должно упасть до 0,7 МПа, что справедливо при только что сделанном допущении. Перепад давления в месторождении, равный ~30 МПа, приводит к смыканию пор, составляющих $4,37 \cdot 10^{-10} \times 30 \cdot 10^6$, или 1,3% объема песчаника мощностью 800 м. Принимая, что ~1/3 часть пор сомкнется в вертикальном направлении, получаем, что за 20 лет эксплуатации произойдет оседание поверхности земли на ~3,5 м. На практике использованная вода будет закачиваться в месторождение на глубину ~1500–1800 м, где гидростатическое давление является нормальным, тем самым снижая поверхностный эффект оседания на глубине 3660 м.

Для рассматриваемого в этой главе случая наиболее подходящими являются расчеты электрической мощности, получаемой при эксплуатации одной скважины, а не данные, касающиеся всего месторождения. Параметры, использованные в приводимых ниже расчетах, относятся к участку Себастиан.

Глубина залегания песчаника, м	4360 – 4570
Мощность, м	214
Температура, °С	160
Давление в месторождении (среднее), МПа	82,5
Общая соленость, г/л	2 – 6
Проницаемость, дарси	0,1 – 0,14
Пористость	~0,25
Площадь месторождения, км ²	>777
Гидростатическое давление на забое на глубине 4,45 км, МПа	43,5
Давление на устье скважины, МПа	>34,4

Вновь примем, что дебит одной скважины составляет $7,95 \cdot 10^3$ т/сут. Электрическую энергию можно получать путем преобразования как тепловой, так и механической энергии воды. Если принять, что единичная скважина будет работать в течение 5 лет, то можно ожидать, что давление на ее устье существенно не понизится. Если перепад температур для воды будет составлять 160 – 93 °С, то при этом будет получено 279 кДж/кг. Принимая к.л.д. теплообменника и электрического генератора равным 10%, находим, что для выработки 1 кВт электрической мощности потребуется воды 129 л/кВт·ч, или 3090 л/сут. Тогда преобразование в электрическую энергию только тепловой энергии воды из одной скважины обеспечит мощность 2,5 МВт.

Преобразование механической энергии при перепаде давления 34,4 МПа может обеспечить получение 1 кВт·ч электрической энергии при расходе воды 189 л. Путем преобразования механической энергии можно получить $7,95 \cdot 10^6 / 189 \cdot 24 = 1750$ кВт. Тогда общая электрическая мощность от одной скважины составит более 4 МВт.

Соленость получаемой воды должна составлять ~5 г/л или менее, причем она должна понижаться в процессе эксплуатации по мере поступления воды из аргиллита после того, как давление в месторождении начнет падать. Такой вывод сделан на основании данных, полученных на других скважинах в южной части тексасского побережья Мексиканского залива. Согласно этим же данным, в 1 л воды

из месторождения здесь содержится 0,0071 м³ метана и примерно такое же количество двуокиси углерода. Метан следует извлекать для использования, а двуокись углерода можно собирать или сбрасывать в атмосферу. Общее количество получаемого метана может составить ~5,7 млн. м³ в год. Солоноватые использованные воды можно закачивать в слои песков, содержащие очень соленые воды, залегающие на глубине 1500 — 1800 м, где давления являются нормальными.

ПРОЕКТ ОПЫТНОЙ ГеоТЭС

Проведенное изучение показало, что на юге шт. Техас возможно сооружение и работа установки для производства электрической энергии при использовании воды от одной скважины. Ее мощность может составить более 4 МВт, и попутно можно будет получить до 5,7 млн. м³ в год метана. Рассмотрение геологии и вопросов защиты окружающей среды показало, что сооружение установки возможно как в Себастиане, так и в Порт-Мансфилде. С учетом дополнительной информации об условиях в недрах признано более целесообразным сооружение установки в Себастиане. Основные цели проекта сооружения такой опытной установки заключаются в следующем.

1. Демонстрация возможности преобразования в электрическую энергию как тепловой, так и гидравлической энергии, заключенных в находящихся под аномально высоким давлением нагретых подземных водах.
2. Определение изменения дебита в зависимости от давления и оценка его увеличения за счет газлифта, а также за счет поступления воды в процессе ее отжатия из аргиллита (глинистого сланца).
3. Изучение изменения состава воды в месторождениях в процессе эксплуатации из-за отжатия воды из аргиллитов.
4. Разработка эффективных методов преобразования механической энергии, заключенной в находящихся под аномально высоким давлением водах, в электрическую энергию.
5. Исследование возможностей использования установки как резервного источника энергии.
6. Определение с помощью точных измерительных приборов движений поверхности, которые связаны с извлечением и закачкой больших количеств воды, используемой при производстве электрической энергии.

Хотя основные принципы получения электрической энергии из горячих вод, находящихся под аномально высоким давлением, известны, тем не менее в ходе сооружения установки возникнут новые инженерные проблемы, которые придется решать. В первые годы работы прежде всего необходимо оценить роль процессов расширения попутных газов и отжатия воды из аргиллитов для поддержания давления на устье скважин. В то же время может оказаться, что отсутствуют методы правильной оценки этих факторов. Хотя с помощью теории конечных разностей можно получить некоторые предварительные данные до бурения, но роль закачки в предотвращении оседания поверхности окончательно может быть определена в ходе работы экспериментальной установки.

Проект опытной установки может затем стать моделью при сооружении аналогичных установок во всем мире. Хотя структурные и стратиграфические характеристики побережья Мексиканского залива неоднородны, но, как указывалось, глубокие, находящиеся под аномально высоким гидростатическим давлением зоны осадочных пород во всем мире одинаковы. Поэтому результаты, которые могут быть здесь получены, затем будут непосредственно использованы на других аналогичных месторождениях.

Побережье Мексиканского залива уникально в том смысле, что зона аномально высокого давления была обнаружена здесь благодаря интенсивным изысканиям нефти и газа. Верхняя граница этой зоны определена почти во всем этом районе. Кроме того, по тысячам разрезов скважин можно судить о солености и температуре вод, заключенных в толще пород. Этот район очень удобен также по климатическим условиям.

Калифорния

В данном разделе использованы материалы исследования [4], выполненного Калифорнийским университетом по заказу Отдела научных исследований ВВС с целью изучения целесообразности освоения геотермальных систем с горячими водами в качестве источника энергии.

Первоначальный план имел целью освоение термального поля Косо, расположенного на территории полигона ВМС США вблизи озера Чайна и представляющегося подходящим местом для изучения геотермальных систем с горячей водой. Однако после получения и публикации многих данных о районе Косо было решено исследовать два

других района, выбор которых обусловлен наличием геотермальных проявлений и их выгодным географическим положением.

Первый район включает Пойнт-Мугу и Порт-Хьюнеми (шт. Калифорния) и характеризуется прежде всего наличием на глубине высоких температур, что выяснено с помощью нефтяных скважин, пробуренных в месторождении около Лос-Анджелеса и около канала Санта-Барбара. Пойнт-Мугу как бы связывает два эти района и в соответствии с основными геологическими показателями является потенциальным месторождением горячих вод. Из приводимых далее данных будет видно, что выбор Пойнт-Мугу не оказался случайным.

База ВМС в Туэнтинайн-Палмс является вторым выбранным районом. Основными причинами для принятия такого решения было наличие здесь двух практически почти совершенно не разрушенных кратеров вулканов Писга и Амбой и связанных с ними интенсивных лавовых потоков. Из скважин, пробуренных в районе Туэнтинайн-Палмс, получены воды с температурой более 50 °С, что явилось еще одной причиной выбора этого района.

УЧАСТОК ПОЙНТ-МУГУ

Выбранные для исследования площади — полигон ВМС Пойнт-Мугу и база ВМС около Порт-Хьюнеми, находятся на калифорнийском побережье в области, известной как равнина Окснард. Равнина на западе омывается Тихим океаном и простирается на север от Пойнт-Мугу до города Вентура. На северо-востоке и востоке она ограничена горами Камарильо и Хребтом Санта-Моника.

Население в Пойнт-Мугу немногочисленно; среднегодовая норма осадков составляет 32 см, а среднегодовая температура 16 °С; предельные температурные колебания составляют 0 — 39 °С.

Мощность отложений, содержащих горячие воды, вблизи полигона и вдоль побережья составляет от 242 м (скважина 1N/21W-32A1) до 450 м (скважина 1N/21W-31L1) [5]. В работе [5] приведены данные по расположению скважин, температурам воды и геологическим разрезам скважин. По разрезу скважины 1N/21W-27F1, расположенной в 2,5 км севернее выбранного участка, видно, что породы основания находятся здесь на глубине 248 м.

Полученные Калифорнийским управлением по водным ресурсам данные по разрезам скважин указывают на отсутствие видимых аномальных движений воды. Согласно Пэйжу [5], помимо локальных внедрений морской воды восполнение подземных вод на равнине Окс-

нард происходит за счет атмосферных осадков, питающих местные дренажные системы.

Вторжение морской воды вблизи Порт-Хьюнеми произошло в результате повреждения скважин 1N/22W-29A1, 29A2 и 29C1, которые давали соленую воду. В скважине 1N/22W-29A2 содержание хлора в 1947 г. не превышало 41 мг/л, поэтому можно предположить, что поступление морской воды началось именно с тех пор. Высокое содержание (850 мг/л) хлора в воде из скважины 1N/22W-28B1 было обнаружено в мае 1958 г. В воде из скважины 1S/21W-4E1 содержание хлора возросло с 0,3 г/л в 1949 г. до 5 г/л в 1953 г. и до 12 г/л в 1958 г. Предполагается, что резкое увеличение содержания хлора произошло в 1948 г. из-за повреждения оборудования [5].

Химический состав подземных вод на полигоне изменяется с глубиной. В отдельных местах в водоносный слой поступает морская вода. Исследуя разрезы скважин, Пэйж установил, что водоносный слой можно разделить на три зоны: 1) неглубокую зону от уровня моря до глубины ~45 м с соленой водой; 2) промежуточную зону на глубине 45 — 300 м ниже поверхности земли с солоноватой водой и 3) глубокую зону на глубине 300 — 450 м ниже поверхности земли с соленой водой.

Проведенные измерения температуры воды не согласовались с ранее полученными в этом районе результатами. Температуры для отдельных скважин изменялись в пределах 24 — 30 °С, но в основном преобладала температура ~19 °С.

Что же касается потенциальных возможностей самого геотермального месторождения в Пойнт-Мугу, то как геологические, так и другие показатели здесь не очень обнадеживающие. Однако отсутствие термальных проявлений может быть связано с вторжением холодной морской воды. Каких-либо дополнительных исследований в ближайшем будущем здесь не предполагается.

УЧАСТОК ТУЭНТИНАЙН-ПАЛМС

Этот район является учебным центром морской пехоты и находится в юго-восточной части пустыни Мохаве, шт. Калифорния. Район занимает площадь 2500 км² и заключен между 115°45' и 116°30' з.д. и 34°15' и 34°45' с.ш. На этой территории расположены отроги гор Буллион, часть гор Шип-Хоул и Лава-Бэд, а также отдельные территории долин Дейл, Туэнтинайн-Палмс, Лавик, Бристоль, Эймс и Сурпрайс.

Юго-западная область пустыни Мохаве является весьма засушливым и малонаселенным районом. Среднегодовая норма осадков составляет здесь 8,9 см, а среднегодовая температура 20°C. Однако сезонные изменения температуры значительны: от 46 °C летом до -7°C зимой. Основная часть годовых осадков выпадает с ноября по апрель, в остальное время года бывают грозы, дополняющие общий поверхностный сток.

Данные об изученных здесь за несколько лет подземных водах и водяных скважинах приведены в работах [6 – 8]. Эти исследования выполнены по заданию Отдела ВМС и содержат данные по температурам, химическому анализу и глубинам. Данные по разрезам скважин в Туэнтинайн-Палмс, а также в долинах Юкка и Дейл приведены в работах [9, 10].

Хотя в этих отчетах рассмотрены в основном районы, расположенные за границами месторождения, приводятся также данные по некоторым скважинам, находящимся на его территории.

Основными водоносными пластами данного района являются аллювиальные отложения, которые образованы конусами выносов в долины и заполняют их на различную глубину. Эти пласты состоят в основном из переходящих друг в друга слоев глины, песка и галечника кайнозойского возраста. Но около гор отложения состоят преимущественно из крупнозернистого неровного детрита.

В работе [9] указано, что движению подземных вод в этом районе препятствуют отдельные барьеры, по-видимому, являющиеся крупными разломами. Эти барьеры разделяют основные пласты на отдельные небольшие бассейны подземных вод, в которых разности уровней в обе стороны достигают 75 м (например, разлом около озера Мескуит-Драй).

Анализ подземных вод из скважин, вскрывших подошву пласта или не достигших ее, показал, что их химический состав сильно отличается. Содержание фтористых соединений изменяется от 0,4 до 100 мг/л, содержание хлора – от 10 до 725 мг/л и содержание бора – от 0 до 1,3 мг/л. Очень высокое содержание фтористых соединений в воде из некоторых скважин в бассейнах Мескуит и Дедман делает такую воду непригодной для питья.

Хотя и не были обнаружены воды с очень высокими температурами [9], следует отметить, что температуру измеряли лишь для 22% всех скважин в этом районе. Высокая температура в скважинах (59 °C и выше) была обнаружена на частных землях, расположенных в нескольких километрах от границ участка (частное сообщение

Д.В. Клика, 1972 г.). Именно эти не использованные пока скважины указывают на возможное наличие геотермальных ресурсов.

В связи с высокой температурой воды в скважинах, расположенных вблизи военной базы в Туэнтинайн-Палмс, и в связи с наличием молодых лавовых потоков, связанных с вулканами Амбой и Писга, предполагалось начать в этом районе дополнительные работы по обнаружению месторождения горячих вод.

УЧАСТОК В РАЙОНЕ ОЗЕРА ЧАЙНА

Район Косо-Хот-Спрингс, расположенный около озера Чайна (шт. Калифорния) и находящийся в ведении ВМС США, был выбран первым для изучения. Район представляет собой очень неровную территорию, включающую отлогую долину и чрезвычайно крутые склоны, и занимает ~1000 км² от 35°40' до 36°10' с.ш. и от 177°35' до 177°55' з.д. в графствах Инио и Керн.

Среднегодовая норма осадков здесь составляет ~11 см, а среднегодовая температура 18 °C; сезонные колебания температуры составляют от -11 °C зимой до 48 °C летом.

Большое число геологических, геохимических и геофизических данных по этому району содержится в отчетах [11 – 14]. В этих отчетах приводятся, в частности, данные по расположению существующих водяных скважин, их разрезы, данные о химическом анализе вод. Рекомендуется проведение дальнейших работ по составлению детальной геологической карты поверхности и завершению геохимической и геофизической разведки.

Предлагается также пробурить 4 – 6 скважин на глубины не менее 100 м. При выборе их местоположения следует использовать сейсмоакустические данные и данные по электрическому сопротивлению. Для определения относительной величины тепловых потоков в данном районе следует провести по крайней мере одно определение теплового потока в непродуктивной зоне. Дальнейшие работы рекомендуются сосредоточить на разведочном бурении с целью определения размеров месторождения.

Айдахо ПРЕДПОСЫЛКИ

Приведенная ниже информация заимствована из отчета [15]. Южная часть штата Айдахо по экономическим соображениям является одним из наиболее перспективных районов США для сооружения

ГеоТЭС из-за неглубокого залегания продуктивных зон месторождений. Этот район считается геологами наиболее молодой частью основной вулканической рифтовой зоны. Долина реки Рафт, выполненная осадочными отложениями, разделенными тектоническими разломами, простирается с севера на юг и скрещивается с основной вулканической зоной, известной как долина реки Снейк.

Именно в бассейне реки Рафт из многих скважин, бурение которых проводилось для ирригационных целей, неожиданно была получена теплая и даже горячая вода. Две из них, пробуренные на глубину 120 и 165 м, дают кипящую воду из артезианского пласта. Они находятся вблизи Молта, где расположено управление фирмы "Рафт ривер рурал электрикал", обеспечивающей снабжение электроэнергией территории площадью 26 тыс. км² на юге центральной части шт. Айдахо, в северо-западной части шт. Юта и в северо-восточной части шт. Невада.

Наличие горячей воды около Молта побудило эту фирму провести предварительные геологические исследования для определения целесообразности сооружения здесь ГеоТЭС.

К работам присоединилась также фирма "Аэроджет нуклиа", ведущая совместные работы с Комиссией по атомной энергии США на ядерной установке, расположенной в 60 км к северу от области, обслуживаемой фирмой "Рафт ривер электрикал". Фирма "Аэроджет нуклиа", в частности, должна была собрать дополнительные геофизические данные о долине реки Рафт.

В отличие от месторождения сухого пара в Долине Больших Гейзеров (Северная Калифорния) месторождение в долине реки Рафт содержит перегретые воды (~150°C) и аналогично другим таким же геотермальным системам на северо-западе США. Температуры здесь не соответствуют экономически выгодному производству электрической энергии. До сих пор не показана экономическая целесообразность и отсутствуют эффективные методы извлечения энергии из таких низкотемпературных источников. Хотя соленость вод здесь низка по сравнению хотя бы с водами месторождения в Серро-Прието, пока неизвестны способы эффективного использования заключенной в них тепловой энергии в течение продолжительного времени.

Если дальнейшие геологические и геофизические исследования все же укажут на возможность использования этой теплоты и на целесообразность разработки соответствующего проекта [15] и для этого найдутся средства, то Комиссия по атомной энергии США и фирма "Аэроджет нуклиа" берутся спроектировать и построить здесь

ГеоТЭС. Фирма "Рафт ривер рурал электрикал" займется вопросами аренды находящихся в частном владении земель, которые выбраны для сооружения ГеоТЭС. Она также обеспечит передачу и использование получаемой электроэнергии. Комиссия по атомной энергии намеревается осуществлять надзор и руководство эксплуатацией этого геотермального месторождения, которое хотя и характеризуется высокой конвективностью системы, но расположено в районе, где запасы подземных вод крайне чувствительны к количеству извлекаемой из системы воды. В связи с этим рассматривается возможность закачки как использованной воды, так и холодной воды из другого источника.

Рассматриваемый район является идеальным для демонстрации возможности извлечения энергии из слабо перегретых вод. Температура 150 °C является нижним пределом для нормальной работы обычных паротурбинных систем. Температура воды из близкого к поверхности водоносного слоя бассейна реки Рафт достигает примерно ~10 °C. При такой температуре холодной воды температура перегретой воды 150 °C может быть удовлетворительной с точки зрения к.п.д. цикла Карно. В качестве рабочей среды при этом можно было бы использовать низкокипящую органическую жидкость, однако необходимы специальные технико-экономические проработки и сопоставления, которых пока нет.

Намечалось, что демонстрационная ГеоТЭС будет иметь паровой и бинарный (с вторичным органическим теплоносителем) циклы в зависимости от нижней температуры цикла и от содержания горячей воды. Предполагалось ввести установку в действие в 1977 г.

Основными целями проекта являются.

1. Продемонстрировать целесообразность извлечения энергии из гидротермального месторождения при полной закачке в него использованной жидкости, причем закачка должна увеличить продуктивность месторождения, максимально ослабить влияние на окружающую среду и свести к минимуму истощение источника энергии.

2. Продемонстрировать экономическую выгоду производства электроэнергии при проектных и рабочих характеристиках ГеоТЭС, работающей при температурах жидкости ниже предельных для современного уровня развития техники (~170 °C).

Краткая сводка состояния дел по осуществлению проекта.

1. Геологическая служба должна была проводить работы по проекту совместно с Университетом в Бойзе в 1973 — 1974 гг. Весной 1974 г. геологические и геофизические

исследования предполагалось закончить.

2. Должна была выполняться программа по бурению неглубоких скважин с целью выявления наличия подземных вод, необходимых для эксплуатации геотермального месторождения. К марту 1974 г. было завершено бурение 18 скважин на глубину порядка 30 м.

3. Проведены переговоры с двумя буровыми фирмами и предпринимаются усилия для обеспечения достаточного количества буровых труб с большим сроком службы.

4. Начато изучение энергетического цикла и предварительное проектирование теплообменников двух типов: для низкотемпературного цикла с парообразованием и низкотемпературного бинарного цикла с органическими жидкостями.

5. Установлены контакты с фирмами "Юта пауэр энд лайт" и "Айдахо пауэр" с целью выяснения, как выполнение проекта будет способствовать в будущем обеспечению местных потребностей в энергии.

СОСТОЯНИЕ ПРОЕКТА

Геологическая служба США начала работы по геологической и геофизической разведке долины реки Рафт в конце 1973 г. Пробурено 18 неглубоких скважин (глубиной 30 м и диаметром 140 мм). Для двух скважин пришлось использовать роторное бурение, так как на глубине 3 – 3,5 м были встречены твердые скальные породы. Наибольшая температура 48 °C наблюдалась на забое скважин глубиной 9 и 12 м, расположенных в восточной части долины. Хотя с помощью этих скважин предполагалось в основном изучать особенности циркуляции подземных вод вблизи поверхности, обнаруженные температуры указывают на циркуляцию нагретой воды с глубины к поверхности.

Петрологический анализ состава пород, поднятых из скважин, был проведен Университетом в Бойзе (работа субсидировалась Комиссией по атомной энергии шт. Айдахо). Затем данные бурения, журналы проходки, результаты наблюдений за буровым раствором, литологические разрезы скважин, а также анализ проб пород, взятых из двух глубоких газонефтяных скважин, были переданы фирме "Рафт ривер рурал электрикал" для оценки затрат на бурение в долине реки Рафт.

В Молта (Грифит-Уайт) на бурение скважины глубиной 2069 м потребовалось всего три недели. Одна фирма по разведке месторождений газа пробурила в конце 1973 г. две нефтегазовые скважины. Обе скважины сразу были заброшены. Через одну из них спусти три

недели после этого стала поступать горячая вода. Ее дебит после этого стали измерять. Время бурения первой скважины для опытной установки также должно быть небольшим, однако значительный объем измерений должен привести к увеличению общего времени бурения.

Изучение циклов и схемы ГеотЭС. Основные усилия были сконцентрированы на изучении параметров системы с целью выявления критерия, с помощью которого можно было бы минимизировать затраты. Работа в основном проведена с одноступенчатым паровым циклом со вскипанием жидкости. Изучение же бинарного цикла (с органической жидкостью) свелось к разработке конструкции соответствующего теплообменника.

Предварительные результаты показывают, что бинарный цикл (с фреоном-12) потребует применения противоточных теплообменников значительной длины (более 30 м), в противном случае перепад температур будет значительно ниже требуемой величины 5 – 8 °C. В связи с этим уменьшится перепад температур для термальной воды (от нее будет отбираться меньше тепла), понизятся рабочие температуры органической жидкости и соответственно к.п.д. работающей на ней турбины.

Литература

1. Herrin E., Development of Geothermal Reservoirs from Over-Pressured Areas Beneath the Gulf Coastal Plain of Texas; AD-766 855 (for the Air Force Office of Scientific Research), Southern Methodist University, 1972.
2. Jones P.H., Hydrology of Neogene Deposits in the Northern Gulf of Mexico Basin, Louisiana Water Resources Research Institute Bulletin GT-2, Louisiana State University, Baton Rouge, 1969.
3. Johnson R.B., Mathy H.E., The South Texas Frio Trend, Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions, v. 7, pp. 207 – 218, 1957.
4. Combs J.B., Feasibility Study for Development of Hot-Water Geothermal Systems, AD-117 016, University of California, March 1973.
5. Page R.W., Geology and Ground Water Appraisal of the Naval Air Missile Test Center Point Mugu, California; U.S.G.S. Water-Supply Paper 1619-S, 1963.
6. Dyer H.B., Ground-Water Conditions During 1960 at the Marine Corps Base, Twentynine-Palms, California: U.S. Geol. Survey open file report, U.S.G.S. Ground Water Branch, Long Beach, California, 1960.
7. Riley F.S., Bader J.S., Data on Water Wells on Marine Corps Base, Twentynine Palms, California: U.S. Geol. Survey open file report, U.S.G.S. Ground Water Branch, Long Beach, California, 1961.

8. Weir J.E., Jr., Dyer H.B., Ground-Water Conditions During 1961 at the Marine Corps Base, Twentynine Palms, California: U.S. Geol. Survey open file report, U.S.G.S. Ground Water Branch, Long Beach, California, 1961.
9. Boder J.S., Moyle W.R., Jr., Data on Water Wells and Spring in the Yucca Valley-Twentynine Palms Area, San Bernardino and Riverside Counties, California: Calif. Dept. Water Resources, Bull. 91 — 92, 1960.
10. Moyle W.R., Jr., Data on Water Wells in the Dale Valley Area, San Bernardino and Riverside Counties, California: California Dept. Water Resources, Bull. 91 — 95, 1961.
11. Austin C.F., Austin W.H., Jr., Leonard G.W., Geothermal Science and Technology — A National Program, Naval Weapons Center, China Lake, California, NWC TS 45-029-72, 1971.
12. Austin C.F., Selection Criteria for Geothermal Prospects: Nevada Bureau of Mines, Report 13, Part C, Reno, Nevada, pp. 93 — 125, 1966.
13. Austin C.F., Pringle J.K., Geologic Investigations of the Coso Thermal Area: Naval Weapons Center, China Lake, California, NWC TP 4878, 1970.
14. Koenig J.B., Garvarecki S.J., Austin C.F., Remote Sensing Survey of the Coso Geothermal Area, Inyo County, California, Naval Weapons Center, China Lake, California, NWC TP 5233, 1972.
15. Kunze J.F., Miller L.G., Idaho Geothermal R and D Project Report for Period December 16, 1973 to March 15, 1974, ANCR-1155, March 1974.

8

ПРЕДЛОЖЕННАЯ ПРОГРАММА ИССЛЕДОВАНИЙ

Непрерывно возрастающая потребность в электроэнергии и воз-
никшая в последние годы озабоченность в связи с проблемой охраны
окружающей среды заставила США обратиться к исследованию новых
источников энергии.

Одним из таких новых источников является геотермальная энер-
гия. Отсутствие надежной информации о национальных запасах гео-
термальной энергии является причиной того, что до последнего вре-
мени этот источник энергии игнорировался при планировании разви-
тия энергетики по сравнению с другими, более изученными источни-
ками.

Однако в других странах, например в Италии, Исландии и Новой
Зеландии, уже в течение ряда лет используется геотермальная энер-
гия, а фирма "Пасифик гэз энд электрик" построила и ввела в дей-
ствие геотермальную электростанцию в северной Калифорнии.

В ответ на предложение Университета Аляски, разработанное
под научным руководством Хикеля, Национальный научный фонд вы-
делил средства по программе RANN исследований энергетических
ресурсов и технологии на проведение в сентябре 1972 г. научно-ис-
следовательской конференции, посвященной проблемам использования
геотермальных ресурсов.

В задачу конференции входила оценка современного состояния
геотермальной науки и технологии и выработка рекомендаций и про-
граммы исследований для получения необходимой информации, позво-
ляющей определить действительную роль геотермальных ресурсов в
обеспечении страны дополнительной энергией и преодолении назре-
вающей нехватки электроэнергии. Кроме того, ставилась задача оп-
ределения потенциальных возможностей использования геотермальных
вод как дополнительного источника снабжения страны пресной водой.

Конференция явилась скорее местом обсуждения практических
вопросов, нежели форумом для обмена научными идеями; в ней при-

няли участие только лица, приглашенные организаторами. Местом проведения конференции был выбран Научно-исследовательский центр в Сиэттле (шт. Вашингтон), специально предназначенный для такого рода рабочих совещаний.

Работа конференции проводилась в шести проблемных рабочих группах, сопредседатели которых были ответственны за привлечение к работе группы специалистов в данном вопросе.

Рабочие группы рассмотрели следующий круг вопросов: разведка геотермальных ресурсов, оценка геотермальных ресурсов, разработка месторождения и организация добычи, методы эксплуатации и рентабельность, влияние на окружающую среду и организационно-правовые вопросы. Сопредседатели представляли мнения и интересы как промышленных, так и академических кругов. В каждую группу был приглашен ученый, находящийся на службе одного из федеральных ведомств.

Данная глава основана на материалах упомянутой выше конференции, проходившей с 18 по 30 сентября 1972 г. [1].

Разведка геотермальных ресурсов

ЦЕЛИ

В задачу рабочей группы, занимавшейся вопросом разведки геотермальных ресурсов, входило определение программ исследований, необходимых для разработки, улучшения и усовершенствования методов геотермальной разведки. Эти методы используются для определения местонахождения районов с высокотемпературными подземными источниками тепла, для оценки запасов месторождений, температуры, пористости и проницаемости пород продуктивной зоны и для определения природы геотермального теплоносителя, который можно получить из данного источника.

Хотя существуют различные типы геотермальных ресурсов, характеризующиеся различными физическими свойствами, рабочая группа сосредоточила внимание на отдельных методах разведки. Сочетание этих методов, которое может оказаться полезным в ходе разведки конкретного месторождения, будет различным для каждого типа ресурсов. Технология глубокого бурения не рассматривается как часть процесса разведки.

Группа рассмотрела следующие методы геотермальной разведки: геологические, геохимические, электрические, сейсмические, гравитационные, магнитные и тепловые. Кроме того, были рассмотрены

возможные области фундаментальных исследований, результаты которых могли бы быть полезны, а также представлены некоторые программы исследований по современной усовершенствованной технологии бурения.

НАПРАВЛЕНИЯ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В настоящее время разведка новых геотермальных месторождений сводится к выявлению районов с термальными источниками. Это весьма напоминает положение дел в нефтедобывающей промышленности в начале 1900-х годов, когда разведка нефти заключалась в отыскании на поверхности земли следов нефти. Необходимы широкие исследования для того, чтобы разработать, улучшить и усовершенствовать методы геотермальной разведки. Ниже рассматриваются некоторые связанные с этим области исследований.

Геологические методы. Геологические методы используются в ходе геотермальной разведки на всех ее стадиях — от определения местоположения до оценки площадки и подробного изучения данных, полученных с помощью бурения, и результатов измерений, проведенных в ходе бурения. Геологические исследования являются основой для интерпретации данных, полученных с помощью геохимических и геофизических методов разведки, и в качестве таковой представляют собой неотъемлемую часть всех стадий геотермальной разведки.

Геологические исследования, необходимые для создания основы для интерпретации данных, включают: определение возраста, размера и характера магматических и вулканических образований, связанных с конвективными гидротермальными системами; исследования природы структурных особенностей, характеризующих местоположение конвективных гидротермальных систем и систем с непроницаемыми породами: связь конвективных гидротермальных систем с обширными областями с повышенным тепловым потоком.

Геохимические методы. Геохимическая разведка геотермальных ресурсов сводится к химическому анализу проб воды и газов из высокотемпературных и низкотемпературных источников, из мест выхода пара на поверхность, неглубоких скважин и поверхностных потоков. Данные этого анализа используются для определения состояния теплоносителя на глубине, оценки минимальной температуры на глубине, оценки постоянства притока воды, предсказания химического состава воды на глубине и определения источников питания. Геохимические данные, накопленные в ходе разведки, также представляют

интерес на стадии эксплуатации геотермального месторождения, и потому важно сохранить их на будущее.

Хотя некоторые гидрогеохимические показатели представляют ценность и находят применение в ходе геотермальной разведки, другие могут служить в настоящее время лишь качественными показателями или вообще не поддаются интерпретации на основе существующей теории и эксперимента. Необходимо исследовать химические, физические и термодинамические свойства растворов в интервале температур 100 – 400°C, зависимость химического состава геотермальных растворов в естественных условиях от первоначальной температуры породы (до бурения), изотопный состав воды и различных растворенных компонентов, в особенности газов.

Электрические методы. До настоящего времени измерения электрического сопротивления являлись одним из основных способов обнаружения геотермальных полей. Геотермальные системы характеризуются термически индуцированными изменениями удельного электрического сопротивления. Оценки фактической температуры и объема системы во многих случаях затрудняются из-за колебаний сопротивления, связанных с изменениями пористости породы, солености воды, структуры породы и частичного вскипания воды.

Очень важно выяснить, как изменяются пористость породы, степень солености воды и давление в реальных геотермальных месторождениях, с тем, чтобы интерпретация полученных данных могла производиться с большей уверенностью. Кроме того, необходимо улучшить методы полевых измерений сопротивления и методы определения истинных значений сопротивления по результатам полевых измерений. Возможно, особенно эффективным окажется использование других методов разведки для улучшения интерпретации данных по электрическому сопротивлению.

Кроме того, необходимо дальнейшее развитие таких электрических методов, как измерение сопротивления при постоянном токе, измерение эквипотенциала, а также электромагнитные, теллурические и магнитотеллурические методы. При разведке крупных месторождений могут представить интерес аэрометоды.

Сейсмические методы. Исследование отражения и преломления волн может быть использовано для определения структуры пород потенциальных геотермальных районов. Помимо классических опытов по регистрации времени прибытия сигнала, необходимо провести дополнительные исследования поглощения и затухания волн и изменения частоты волн в известных высокотемпературных системах. Гео-

термальные районы характеризуются высоким коэффициентом затухания и сдвигом к более низким частотам распространяющихся сейсмических волн. Возможно, эти данные можно использовать в качестве показателя внутренней температуры бассейна.

Подробные исследования, проведенные в Исландии, в Эль-Сальвадоре и США (шт. Калифорния), указывают на тесную связь сейсмической активности с геотермальными полями. Подземные толчки происходят на небольшой глубине (6 км) и являются довольно слабыми. Точное определение картины землетрясения облегчает выявление границ разломов, по которым горячий раствор может подниматься до уровня, доступного для бурения.

Хотя большинство специалистов сходятся во мнении, что снижение геотермального давления скорее уменьшит опасность землетрясения, чем увеличит ее, необходимо понять причину таких толчков и оценить влияние геотермальных теплоносителей и высоких температур на подверженность пород расколам и смещению. С этой точки зрения следует изучить потенциальные и разрабатываемые геотермальные районы.

С геотермальными районами в Новой Зеландии и в долине Импириал-Валли на юге Калифорнии соотносятся области с высоким уровнем фонового движения пород (сейсмический шум). Наблюдения за сейсмическими шумами в потенциальных геотермальных районах ведутся во многих странах. Следует провести исследования, чтобы оценить колебания шума во времени и пространстве, характеристики опознанных источников шума, спектры шума и его когерентность, направление его распространения и кажущуюся скорость, местоположение источников шума и его причину.

Методы гравитационных и магнитных измерений. Гравитационные и магнитные особенности геотермальных систем сильно различаются в зависимости от геологических условий местности. Не существует простого ответа на вопрос о том, какой тип аномалии следует ожидать в том или другом месте. Однако эти методы оказались полезными при разведке известных геотермальных бассейнов для определения общих структурных особенностей и при выявлении потенциальных геотермальных систем. Их следует считать методом рекогносцировки при описании районов, которые могут оказаться геотермальными.

Требуется дополнительно исследовать вопрос о причине таких аномалий, связанных с известными геотермальными полями, а также выяснить, можно ли их считать показателем внутренней температуры системы.

Тепловые методы. Измерения тепловых характеристик дают возможность непосредственно оценить размер и потенциал геотермальной системы. С точки зрения стоимости и эффективности их можно расположить в следующем порядке: измерения температуры на поверхности, распределения геотермического градиента, определения теплового потока.

Необходимы дополнительные измерения регионального теплового потока, чтобы уточнить предварительные оценки известных геотермальных ресурсов. Необходимо всестороннее исследование с целью определения соотношения между градиентами температуры, распределением изотерм по глубине и геометрией геотермальных систем. Требуется также провести измерения температур в лабораторных условиях на моделях геотермальных систем. Необходимы гидрогеологические исследования, чтобы полнее понять влияние движения подземных вод на локальные геотермические градиенты.

Бурение. В США разработаны надежные методы бурения на глубины от сотни метров до 7500 м при температурах до 200°C. Скважины для измерения градиента температуры бурят с помощью методов, используемых при проходке скважин для сейсмических взрывов. Для этих измерений требуются неглубокие скважины малого диаметра. Существующие методы достаточно эффективны и недороги, поэтому дополнительные исследования не требуются. Скважины для измерения теплового потока бурят методами, применяемыми при разведке полезных ископаемых. Эти методы надежны, хотя стоимость работ выше, чем при бурении скважин для измерения градиента температуры. Число скважин для измерения теплового потока не настолько велико, чтобы оправдать расходы на исследования, направленные на снижение стоимости этих работ. Скорее следует рекомендовать использовать существующую технологию бурения.

Апробирование пластов в скважинах, не обсаженных трубами, может дать полезную исходную информацию для разведки геотермальных месторождений с жидким теплоносителем. Не решена задача определения интервала взятия проб в рыхлых песчаниках и в трещиноватых породах бассейнов. Исследования в этой области были бы полезны для проектов по разработке геотермальных ресурсов, добыче нефти и газа и получению воды. Дешевый способ извлечения образцов породы вместе с заключенной в них геотермальной жидкостью мог бы облегчить моделирование геотермальной ячейки.

Измерительная аппаратура, имеющаяся в настоящее время, работает неудовлетворительно при температурах выше 200°C. Необходи-

димо немедленное исследование методов передачи информации из забоя скважины на поверхность. Создание дешевых буровых растворов, обладающих низкой плотностью и малой вязкостью, не чувствительных к колебаниям температуры, с высокой теплопроводностью и высоким поверхностным натяжением улучшило бы технологию бурения и тем самым снизило бы его стоимость, одновременно обеспечив максимально возможное ненарушенное состояние забоя скважины.

Для будущих программ потребуется документация всех полученных данных. Консервация и хранение кернов, образцов породы и записей в рабочих журналах потребует средств, которые нельзя отнести в рубрику собственно исследования; однако без этих расходов невозможно эффективное проведение работ в данной области.

Фундаментальные исследования. Существует настоятельная потребность в изучении физических свойств пароводяных смесей, типичных для геотермальных систем. Эта информация необходима для облегчения интерпретации результатов геофизической разведки и для определения оптимальных условий эксплуатации.

Необходимы исследования в области геотермии и гидрогеологии, чтобы лучше понять природу источника энергии в геотермальных системах, которые могут быть разработаны, а также основных механизмов передачи энергии (теплопроводностью, конвекцией и излучением) в коре и верхней части мантии. Кроме того, представляет большой интерес механизм передачи энергии в конкретных геотермальных системах (теплопроводность, конвекция однофазных и двухфазных теплоносителей).

Требуется изучение размещения геотермальных систем, пригодных для эксплуатации, в свете современных теорий наук о земле (модели распространения океанических и платформенных тектонических структур), чтобы установить закономерности распределения геотермальных аномалий по всему земному шару.

Следует направить усилия на решение ряда математических задач, встающих в ходе разведки и эксплуатации геотермальных систем. Особый интерес представляют задачи, связанные с геотермией, гидрогеологией, обработкой данных и общей теорией интерпретации данных. Это требует исследований в области прикладного математического анализа, численного анализа и моделирования с помощью вычислительных машин.

Должны быть исследованы и разработаны новые методы геотермальной разведки в области сейсмологии, методов измерения потенциала поля и упругих напряжений. Следует предпринять разработку теории оптимизации методов и техники разведки.

Оценка геотермальных ресурсов

ЦЕЛИ

В задачу рабочей группы, занимавшейся этой проблемой, входило определение программ исследований, необходимых для получения надежной количественной характеристики геотермальных ресурсов всех типов и для определения размеров геотермальных месторождений на всей территории США. Такие программы не предусматривают ни исследования методов разведки, ни изучения методов разработки и эксплуатации месторождений.

НАПРАВЛЕНИЯ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Намечаемая программа исследований включает как фактическую оценку геотермальных ресурсов, так и развитие методологии оценки. Во всех случаях оценке подлежат три компонента: тепло, минеральное сырье и вода. В ходе осуществления программы должно быть составлено общее описание (кадастр) всех геотермальных месторождений, находящихся на территории США. Для правильной оценки многих геотермальных месторождений важно осуществить программу работ с применением глубокого бурения. Ниже кратко рассматривается ряд проблем, которым следует уделить основное внимание.

Гидротермальные конвективные системы. В настоящее время использование геотермального тепла полностью осуществляется за счет эксплуатации гидротермальных конвективных систем, в которых основная часть энергии передается на поверхность глубинным теплоносителем. Такие системы характеризуются высокими температурами вблизи поверхности земли, наличием естественных флюидов, передающих тепловую энергию на электростанцию, возможностью использования геотермальных растворов на опреснительных установках или для получения минерального сырья.

Известно два основных типа конвективных систем. Большинство ныне действующих в мире геотермальных электростанций используют энергию относительно редко встречающихся систем с преобладанием паровой фазы (сухой пар). В ближайшем будущем развитие геотермальной энергетики будет происходить в основном за счет использования энергии гораздо более распространенных систем с преобладанием жидкой фазы. Проблемы, которые требуется решить, чтобы правильно оценить гидротермальные конвективные системы США, кратко описаны ниже.

Для правильного понимания динамики гидротермальной конвективной системы необходимо определить размер, естественное время жизни, условия и скорости циркуляции, происхождение и режимы течения для ряда характерных природных гидротермальных систем. Полученная информация позволит сформулировать критерии и основные особенности универсальной модели гидротермальной конвективной системы, которая должна затем найти подтверждение в полевых условиях на конкретных, ранее не рассмотренных объектах. Как только будет разработана методология моделирования и ее пригодность подтверждена, можно будет применить эту технологию для оценки месторождений данного типа, а полученные оценки могут быть затем внесены в описание всех месторождений США.

Работа по созданию модели и конкретные оценки, упомянутые выше, основываются на данных о геологических, геохимических, геофизических, гидрогеологических и тепловых характеристиках гидротермальных конвективных систем. Вследствие большого разнообразия и геологической сложности гидротермальных конвективных систем эти оценки требуют накопления огромного количества данных, которые будут очень полезны при последующей разработке таких месторождений. Таким образом, все данные должны быть занесены в общее описание месторождений.

Месторождения, находящиеся под аномально высоким давлением. Аномально высокое давление, под которым находится флюид в бассейне в северной части Мексиканского залива, связано с наличием высокопористых отложений, в которых накапливающаяся вода запасает геотермальную энергию уже в течение миллионов лет. Эти отложения простираются в виде 1200-километрового пояса под прибрежной полосой, проходят под прибрежной равниной и захватывают соседний межконтинентальный шельф. Водоносные слои имеют прерывистый характер, встречаясь в виде разделенных на части блоков, зажатых между сбросами, которые, как правило, идут параллельно береговой линии. Сходные водоносные слои обнаружены в штатах Вайоминг и Калифорния.

Как правило, бассейн, который может быть использован для производства электроэнергии, должен содержать большие объемы проницаемого песчаника. Поскольку вода формации насыщена метаном, извлекаемая на поверхность вода может служить источником трех видов энергии: тепловой энергии, химической энергии метана и механической энергии, обусловленной высоким давлением получаемой воды. Связанные с этим проблемы, требующие исследования и оценки, рассматриваются ниже.

На первой стадии оценки геотермальных ресурсов необходимо провести региональное изучение месторождений на основе тех данных, которые в настоящее время накопились в документах нефтяных фирм. В связи с тем, что документы являются частной собственностью фирмы (хотя сами данные о месторождениях обычно не рассматриваются как частная собственность), для получения необходимых данных потребуются коллективные действия, в ходе которых каждая фирма извлечет необходимую информацию из своей документации и передаст ее группе, проводящей оценку геотермальных ресурсов. Для изучения ресурсов потребуются создание группы, не зависящей от нефтяных фирм.

В задачу этой группы входит сбор всех имеющихся данных о температуре, геологической структуре, фациях осадочных пород, содержании вод, распределении потенциала давления и содержании метана месторождений, находящихся под геостатическим давлением. С этой точки зрения представляют интерес районы побережья Мексиканского залива, а также штаты Вайоминг и Калифорния.

Как и в случае гидротермальных конвективных систем, потребуется создать модели, чтобы охарактеризовать динамику находящегося под геостатическим давлением бассейна, и затем применить эти модели для оценки месторождений данного типа. Геология таких бассейнов кажется несколько проще, чем геология гидротермальной конвективной системы. В связи с этим оценка подобных бассейнов потребует несколько меньших усилий.

Модели должны связать размеры, расходы из соседних формаций, происхождение, естественное время жизни, условия и скорость циркуляции характерного месторождения, находящегося под гидростатическим давлением.

Полученные оценки должны быть занесены в упомянутое выше описание месторождений.

Разработка модели и фактическая оценка ресурсов основываются на геологических, геохимических, геофизических, гидрогеологических и тепловых характеристиках указанных месторождений. Следует ожидать, что значительное количество этих данных придется собирать с помощью полевых испытаний, несмотря на то что в документах нефтяных компаний содержится, по-видимому, значительная часть необходимой информации.

Горячая водонепроницаемая порода. Тепло, накопленное в коре, мантии и ядре земного шара, составляет огромные энергетические ресурсы. В настоящее время человеком используется ничтожная доля этой энергии, которая доставляется на поверхность или по крайней мере на небольшие глубины от поверхности земли за счет процессов

конвекции природного пара и гидротермальными конвективными системами. Остальная часть еще недоступна в качестве источника энергии, поскольку еще не разработаны средства доставки такого тепла на поверхность.

Был предложен ряд способов разработки этого нового огромного источника энергии путем организации искусственной системы циркуляции бурением двух скважин и созданием искусственной трещиноватости пород между этими скважинами. Рассматривается ряд методов создания искусственной трещиноватости пород, такие, как гидравлический разрыв, химический взрыв, обработка кислотой, ядерный взрыв и тепловое растрескивание.

Обсуждаемая ниже программа исследований направлена на разработку методологии оценки, а также на фактическую оценку этих ресурсов. Никаких предположений об относительных преимуществах того или иного способа не делается.

Горячая водонепроницаемая порода может встречаться в виде двух существенно различных конфигураций. Во-первых, и это относится ко всей территории США, можно ожидать, что горячая водонепроницаемая порода залегает под всей территорией страны, даже в районах с пониженным тепловым потоком. Это предположение основано на том представлении, что атмосферная вода проникает лишь на некоторую, довольно постоянную глубину и что лежащие на большой глубине породы либо выкристаллизовались из магмы, либо настолько сильно перекристаллизовались, что практически являются водонепроницаемыми.

Во-вторых, за геологические отрезки времени магма проникала в мантию и кору в результате еще не понятных геологических процессов. Такая магма оказывалась как бы захваченной в ловушку и либо уже выкристаллизовалась, либо находится в процессе кристаллизации, образуя магматические интрузии. Разработка методологии оценки и фактическая оценка таких интрузивных образований является целью данной части программы исследований.

Можно полагать, что оценка месторождений, находящихся на большой глубине, будет возможна без дополнительных исследований или полевых измерений, если будет разработана технология глубокого бурения. Такая разработка практически сделает геотермальную энергию действительно доступной во всех областях США. В районах со средним градиентом температуры ($20^\circ\text{C}/\text{км}$) температуру 200°C

следует ожидать на глубине 10 км.

Чтобы разработать методологию, необходимую для оценки источника энергии в виде горячих водонепроницаемых пород, следует решить ряд задач: изучить механические свойства пород, смоделировать гидродинамику трещинной системы, изучить гидрологические условия участка и системы расположения скважин, изучить природу пригодных растворов для закачки, выбрать места для проведения опытных работ, пробурить скважины для закачки и для извлечения раствора и создать искусственную трещиноватость в породах формации.

Магматические системы. Продолжающаяся до сих пор вулканическая активность на Гавайских островах относится к поверхностным проявлениям непрекращающегося поступления магмы мантии в верхние слои коры. Этот огромный источник энергии, характеризующийся очень высокой температурой, ставит перед нами уникальные проблемы и создает возможность нового подхода к извлечению энергии из горячей магмы.

С учетом Гавайских островов и Аляски на территории США расположено более пятидесяти активно действующих вулканов. Однако вполне вероятно, что число не обнаруженных на поверхности интрузивов, расположенных на глубине, значительно превосходит число действующих вулканов. Чтобы оценить тепловые ресурсы магмы, необходимо провести геологические, геофизические, геохимические, гидрогеологические и тепловые измерения на типичных месторождениях. Потребуется бурение формаций, окружающих магматический очаг. Собранные таким образом информация будет использована для создания модели для оценки магматических геотермальных ресурсов.

Кадастр геотермальных ресурсов на территории США. Ранее неоднократно отмечалось, что необходимо централизованное хранение всех оценок, сделанных в ходе выполнения программы исследования геотермальных ресурсов США, для последующего использования при разработке и эксплуатации месторождений. Кроме того, необходимо сохранить все данные, потребовавшиеся при моделировании, а также основные образцы породы, которые могут быть впоследствии использованы для различных видов анализа. Хотя деятельность такого рода обычно не относится к собственно исследованиям, создание общего описания всех геотермальных месторождений страны явится одной из главных задач, выполнение которой позволит превратить менее доступные и изученные геотермальные районы в действительный источник энергии.

Глубокое бурение. Глубокое бурение для апробирования нагретых пород является важнейшим фактором при определении характе-

ристик геотермальных месторождений. Глубокое бурение в программе оценки геотермальных месторождений включает разбуривание по крайней мере четырех скважин на глубину более 6 км в формации с очень высокими температурами.

Полученные данные дадут возможность оценить характеристики типичных геотермальных районов на ранее недоступных глубинах. Передний край геотермальной науки и технологии продвигнется в совершенно неизведанную область, благодаря чему, возможно, будет получена информация чрезвычайной важности для дальнейшей разведки и расширения общей геотермальной энергетической базы страны. Это может открыть значительно большие резервы источников геотермальной энергии для будущих разработок.

В связи с трудностями и расходами на глубокое бурение в высокотемпературных породах первоочередной задачей в намечаемой программе исследований становится поиск новых методов бурения. Необходимо изучить такие методы, как эрозионное бурение, бурение с электроплавкой, турбобурение и т.п.

Разработка месторождения и его эксплуатация ЦЕЛИ

В задачу рабочей группы, занимающейся вопросами разработки месторождений и их эксплуатации, входило наметить программу исследований, которые явились бы необходимой предпосылкой для оптимальной разработки конкретного геотермального месторождения и его эксплуатации. При этом имелось в виду использование всех возможных компонентов геотермальных ресурсов: выработка электроэнергии, получение пресной воды, производство минерального сырья и технологического тепла.

Информация, полученная в ходе разведки месторождения, при моделировании, а также данные, использованные при оценке его ресурсов, служат обоснованием для разработки месторождения и его эксплуатации. Однако модели придется существенно модифицировать, чтобы отразить поведение месторождения при различных условиях отбора и закачки раствора и разных режимах эксплуатации.

В модели должна быть учтена проблема продолжительности жизни месторождения при указанных условиях эксплуатации. Кроме того, данные, полученные в ходе разведки и оценки ресурсов, должны быть дополнены информацией, полученной из разведочных и опытных скважин. В связи с этим стадия разработки месторождения и орга-

низации добычи включает некоторые исследования в области техники бурения.

НАПРАВЛЕНИЯ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Необходимы широкие исследования, чтобы создать надежную основу для разработки геотермального месторождения и его эксплуатации. Эти исследования являются предпосылкой окончательной оценки потенциального вклада геотермальных ресурсов в экономику страны. Описанные ниже области исследования охватывают широкий круг проблем. В ряде случаев невозможно полностью конкретизировать поставленные задачи.

Исследование геотермальной системы. Существует насущная потребность в работах по созданию аппаратуры и методик исследования геотермальных систем. Для исследований обычных геологических систем используются аппаратура для электрокаротажа, пробоотборники, устройства для взятия керна с забоя и стенок скважины, датчики для измерения температуры и давления, аппаратура для измерения расхода в скважине, уровня радиоактивности и акустических характеристик, а также для определения химических свойств компонентов и химического поведения систем жидкость — твердая фаза.

Обычное измерительное оборудование и аппаратура надежно работают при температуре до 175°C . Существуют приборы, рассчитанные на работу при температуре до 260°C , но они ненадежны.

Далее, измерения, проводимые с целью изучения геотермальных систем, требуют дополнительных ассигнований. Дело в том, что задачи бурения нередко вступают в противоречие с исследовательскими задачами. Поскольку стоимость буровых работ часто превышает 60% общей стоимости разработки геотермального месторождения, очень важно, чтобы бурение каждой скважины проводилось быстро. Получение информации о гидротермальной системе удлиняет время бурения, которое следует оплачивать, а необходимость в информации не всегда очевидна для частного производителя пара. В некоторых случаях, возможно, следует ограничиться бурением специальных скважин малого диаметра исключительно с целью получения необходимых данных.

Коммерческие фирмы, занимающиеся в настоящее время разработкой аппаратуры и методов изучения геотермальных систем, следует убедить в необходимости расширения сферы деятельности на разработку программ освоения месторождений, которых пока нет

вследствие ограниченного спроса. Возможно, следует субсидировать и другие компетентные организации с тем, чтобы увеличить объем исследований в области изучения геотермальных систем.

Хотя геотермальные системы подчиняются известным физическим законам, следует помнить, что многие важные физические, химические и тепловые свойства компонентов геотермальной системы еще никогда не измерялись при высоких температурах. Не исключено, что в геотермальных системах действуют неизвестные физические механизмы. Следовательно, в этой области желательно проведение фундаментальных исследований.

Инженерные проблемы разработки месторождения. Инженерные проблемы включают определение размера и производительности месторождения, а также планирование его оптимальной разработки. В этом смысле инженерные проблемы теснейшим образом связаны с методами эксплуатации и рентабельностью, с одной стороны, и с проблемами влияния на окружающую среду, с другой. Нельзя составить правильный план инженерной разработки месторождения, не имея плана его эксплуатации, определяющего в свою очередь влияние на окружающую среду, которое тоже должно найти отражение в плане инженерной разработки месторождения. Тем не менее ниже рассматриваются лишь инженерные проблемы разработки месторождения, которые должны быть решены, чтобы облегчить организацию добычи геотермальной жидкости.

Чтобы использовать месторождение наиболее эффективно и чтобы месторождения, по виду маломощные, не выпали из поля зрения исследователей, необходимо провести ряд фундаментальных исследований. К ним относится изучение физического, теплового и химического поведения многофазной водной системы (пар — жидкость — твердая фаза) в пористой породе с целью выявления физических принципов построения различных физических и математических моделей систем с геотермальной жидкостью. Эти исследования должны включать детальное изучение явлений, связанных с переносом жидкости. Необходимы полевые инженерные исследования для сбора данных, используемых при построении математических моделей.

Эти модели должны быть достаточно подробными, чтобы сделать возможным определение оптимального расстояния между скважинами, оптимальных условий отбора жидкости из водоносных слоев, за качки конденсата и охлажденных жидкостей в месторождение и охлаждения за счет вскипания жидкостей в скважине, а также проведение исследований изменения проницаемости породы вследствие

выпадения солей и твердых осадков и других важных параметров.

Эффективные полевые исследования требуют тщательно продуманного плана получения данных и правильного хранения полезной информации о месторождении (в виде упомянутого выше национального кадастра месторождений США), чтобы избежать дублирования при разработке инженерных исследований. С этой целью надо создать специальные опытные геотермальные площадки, на которых будет происходить сбор информации и проверка расчетов, касающихся инженерных и гидрогеологических проблем. Такой подход позволит прогнозировать рабочие характеристики на основе соответствия фактических характеристик математическим моделям.

Технические и организационные проблемы производства. Технические и организационные проблемы производства решаются в зависимости от использования месторождения. В настоящее время основными сферами использования являются выработка электроэнергии, отопление помещений, производство минерального сырья и опреснения воды.

К современным проблемам, не включающим производственное оборудование, но тем не менее требующим исследования, относятся: планирование использования земли (права на использование поверхностных и подземных вод и добычу минералов), определяемые законом правила производства геотермальной жидкости, многочисленные вопросы, связанные с защитой окружающей среды (шум, химические отходы, сейсмическая активность, оседание почвы и т.п.), и закачка охлажденных жидкостей. Существует множество других, более обычных проблем, связанных с истощением скважин, повышением их продуктивности, коррозией и образованием отложений, сепарацией геотермальной жидкости и измерением расхода, а также с критической скоростью потока в трубопроводах и клапанах.

Существует одна важная проблема, которая сдерживает разработку геотермального месторождения. Это время между завершением сооружения скважины и завершением строительства электростанции, связанных с ней линий передач и прочих объектов. Поскольку при длительном неиспользовании скважины она может быть повреждена, в результате чего снизится ее продуктивность (кроме того, непроизводительно истощается месторождение), следует рассмотреть вопрос о промежуточном режиме эксплуатации электростанции и обеспечить рынок для этого периода добычи пара.

Технология и методы повышения продуктивности скважины. Эффективность методов повышения продуктивности скважин доказана

опытом, накопленным в нефте- и газодобывающей промышленности. Многие из этих методов могут оказаться эффективными для повышения продуктивности геотермальных скважин. При этом скважины с малой продуктивностью могли бы стать экономически эффективными.

Следует рассмотреть все способы повышения продуктивности: гидравлическое разрушение пород и тепловое растрескивание, обработку кислотой, химические и ядерные взрывы. Все они могут быть применимы для увеличения проницаемости пород и в равной степени эффективны как для эксплуатационных, так и для нагнетательных скважин. Огромные полости, образующиеся в результате ядерных взрывов, могут найти дополнительное применение. Так например, их можно было бы использовать для сбора минеральных осадков, выпадающих при испарении горячей воды, и (или) для обеспечения пространства для испарения жидкости под землей.

Многие обширные геотермальные области неспособны обеспечить экономически выгодное производство энергии, но могли бы стать местом проведения научных исследований и сбора огромного количества ценной информации. Проведение в этих районах экспериментов по повышению продуктивности могло бы оказаться весьма выгодным.

Потенциальная энергия, которую можно извлечь из сухой горячей породы, по-видимому, очень велика, хотя существование таких ресурсов на небольшой глубине еще требуется доказать. Предполагается, что вблизи Мэрисвилла (шт. Монтана) на глубине 2 км расположено геотермальное поле с температурой порядка 500°C . Сопоставление измерений теплового потока и распределения значений ускорения силы тяжести указывает на наличие геотермального района, в котором, согласно предварительным оценкам, до глубины 5 км за счет снижения температуры горячей породы всего на 300°C можно получить энергии на миллиарды долларов. Если эти данные подтвердятся, необходимо заняться вопросом организации экономически эффективного производства.

Существует два метода извлечения энергии из горячей сухой породы путем закачки воды в породу через искусственно созданные трещины. Первый метод состоит в создании резервуара путем гидравлического разрушения породы с возможным увеличением площади трещин за счет теплового растрескивания пород. Второй метод предусматривает создание трещин с помощью ядерного взрыва. Оба метода требуют дальнейших полевых экспериментов.

Тепло, заключенное в вулканической лаве и магме, также может стать возможным источником энергии, который требует долгосрочной

программы исследований методов производства этой энергии.

Технология и методы бурения. Исследование процесса бурения, о котором идет речь в данном разделе, направлено на улучшение современной технологии. Спрос на специальное геотермальное оборудование настолько мал, что фирма-производитель не может оправдать расходы на исследования и разработку нового оборудования. Обычное же оборудование не выдерживает высоких температур. Особенно остро стоит вопрос о резиновых уплотнениях, клапанах, цементах, растворах, теплозащитных покрытиях, шумоглушителях и т.п. Субсидирование федеральным правительством контрактов с частными фирмами по исследованию и разработке этих проблем могло бы внести вклад в повышение безопасности и эффективности буровых работ. Кроме того, этими проблемами могли бы заняться федеральные лаборатории.

Технология и стоимость буровых работ являются важным фактором в процессе разведки и использования природных ресурсов. Следует расширить исследования в области роторного и эрозионного бурения, бурения с электроплавкой и других способов бурения. Эти исследования рекомендуются для обеспечения исследований, связанных с оценкой геотермальных ресурсов. Разработка принципиально новых способов бурения была бы огромным вкладом в проблемы оценки и разработки геотермальных месторождений.

Аналогичная ситуация существует и в области измерительной аппаратуры. Для измерения температуры и давления и отбора проб породы из геотермальных скважин требуются приборы, работающие при высоких температурах. Большинство стандартных приборов непригодно для использования в геотермальных скважинах. Анализ характеристик месторождения будет связан с большими трудностями до тех пор, пока не станут возможными надежные измерения.

Методы эксплуатации и экономическая эффективность ЦЕЛИ

В задачу рабочей группы, занимавшейся изучением методов эксплуатации и вопросами экономической эффективности разработки геотермальных месторождений, входило наметить программу исследований и разработок, в том числе опытных проектов, которые необходимы для разработки, усовершенствования и демонстрации методов эксплуатации геотермальных систем различных типов в широком интервале температур.

НАПРАВЛЕНИЯ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования, рекомендованные рабочей группой, охватывают следующие области: системы с преобладанием паровой фазы, системы с преобладанием жидкой фазы, системы с аномально высоким давлением, системы термoeлектрического преобразования, системы с искусственно созданной трещиноватостью, а также вопросы экономической эффективности производства и создания демонстрационных установок.

Системы с преобладанием паровой фазы. Методы эксплуатации таких источников пара, как в Лардерелло или в долине Больших Гейзеров, хорошо разработаны. В таких системах сухой пар поступает непосредственно из месторождения и используется в качестве рабочего тела в турбине, приводящей в действие генератор. Возможность получения воды от такого рода системы весьма маловероятна.

Состав и количество неконденсирующихся газов в таком паре весьма различны. Для максимального повышения к.п.д. электростанции, уменьшения коррозии оборудования, а также из соображений охраны окружающей среды необходимо удаление этих газов. Уже в течение некоторого времени ведутся работы по программе, осуществляемой фирмой "Пасифик гэз энд электрик", с целью решения вопроса о сокращении выбросов в атмосферу сероводорода, и можно надеяться, что эти работы будут успешно завершены. На других месторождениях остро стоит вопрос о борьбе с выбросами аммиака и других газов.

Твердые частицы, содержащиеся в паре, вызывают эрозию лопаток и клапанов турбины. С целью максимального снижения эрозии и сохранения рабочих характеристик теплообменного оборудования желательно по возможности вывести твердые частицы из потока пара до его поступления в эксплуатационное оборудование.

Геотермальные электростанции характеризуются повышенным уровнем шума, который необходимо снизить. В настоящее время удалось значительно снизить шум при выпуске пара из скважин, в процессе сброса давления в системе сбора пара и в ходе общих операций, осуществляемых на самой электростанции. Для решения проблемы борьбы с шумом разработана соответствующая технология.

Вместе с влажным паром в эксплуатационное оборудование могут попасть растворенные соли. Кроме того, образующийся из силикатов кремнезем может вызвать обрастание турбин и ухудшить их рабочие характеристики, уменьшить расход пара в трубопроводе.

Борсодержащие соединения могут сократить срок службы оборудования. В связи с этим следует провести изучение способов предотвращения попадания в оборудование растворенных солей.

Системы с преобладанием жидкой фазы. Такие месторождения производят горячие жидкости (в основном воду), в которых могут быть растворены различные соли. В этом случае тепло для производства электроэнергии получают либо превращением жидкости в пар, либо передачей его вторичному теплоносителю. Возможно также получение пресной воды путем конденсации и сбора пара. Кроме того, горячая вода может быть использована для теплофикации, как это делается в Исландии, и для производства минерального сырья. Иногда удается организовать многоцелевое производство, что может оказаться более выгодным с экономической точки зрения, чем использование месторождения лишь с какой-то одной целью.

Как и в месторождениях с преобладанием пара, в этих системах также встает проблема неконденсирующихся газов. При этом различия между двумя типами систем носят количественный характер, основные же методы удаления и выброса газов практически одинаковы.

Проблема снижения уровня шума в случае месторождений с преобладанием жидкой фазы осложняется тем, что при вскипании жидкости на выходе из скважины образуется двухфазная смесь. В связи с этим приходится рассеивать большее количество энергии, а следовательно, использовать более крупные и дорогостоящие устройства по сравнению с теми, которые устанавливают в паровых скважинах. Для решения этой проблемы требуется создание лучших глушителей.

Геотермальная жидкость часто содержит большое количество растворенных солей. При частичном превращении жидкости в пар эти соли остаются в жидкой фазе, которая таким образом становится пересыщенным раствором, из которого происходит выпадение солей в осадок.

Для сбора информации, необходимой для проектирования эксплуатационного оборудования, потребуется определение типов и концентраций растворенных солей для различных месторождений. Выпадение этих солей в осадок создает серьезную проблему загрязнения оборудования. Кроме того, они могут образовывать пробки, закупоривающие подводящие флюид трещины в породе, если переход в паровую фазу происходит под землей.

В некоторых районах, содержащих концентрированные растворы, потребуется закачка жидкости в недра. Жидкость, используемая для закачки, должна быть соответствующим образом обработана

чтобы быть совместимой с раствором, содержащимся в толще пород. Для этой обработки потребуется создание специального оборудования.

Чтобы избежать вредного влияния на окружающую среду, возможно, придется отказаться от закачки в недра геотермальной системы добываемого концентрированного раствора и конденсата пара. Возможно потребуется создание другой схемы их удаления, которая не была бы слишком сложной и не создавала бы угрозу окружающей среде.

Осадки и отсепарированные от геотермальной жидкости твердые частицы могут содержать полезные минералы. Однако большая часть полученных таким образом минералов не представляет промышленной ценности и должна просто удаляться из раствора. Возможным решением этой проблемы является захоронение, промывка и закачка в недра, однако этот вопрос требует исследования.

Применение энергетических циклов с вторичным теплоносителем позволило бы иметь изолированное рабочее тело с заданными характеристиками, выбранными для оборудования, давления и температур данного цикла преобразования энергии. В такой схеме потребовался бы теплообменник для передачи тепла геотермальной жидкости вторичному теплоносителю. В связи с этим необходимы исследования термодинамических свойств различных подходящих рабочих жидкостей.

Как показывают тщательный инженерно-экономический анализ и предварительные конструктивные проработки, потребуется подобрать характеристики рабочей жидкости (возможно, даже химически синтезировать новую жидкость) в соответствии с требованиями эксплуатационной системы.

Размеры и мощности турбин, по-видимому, увеличатся, однако фирмы-производители в состоянии провести необходимые исследования и разработки. В прошлом это имело место по мере появления рынка сбыта.

Понадобится дополнительное исследование специальных проблем выхода из строя теплообменного оборудования под действием концентрированной геотермальной жидкости. Как и в случае турбин, фирмы-производители этого оборудования всегда проводят такие исследования за счет своих фондов.

Как статические, так и кинетические физико-химические свойства концентрированных геотермальных растворов являются основой для проектирования эксплуатационного оборудования. Применительно к геотермальным растворам, получаемым из фонтанирующих скважин с последующим концентрированием в них солей в результате выпаривания жидкости в испарительной установке, требуется изучение химической кинетики концентрированных геотермальных растворов.

Можно ожидать, что в некоторых случаях разработка геотермального месторождения может оказаться экономически более выгодной, если горячая геотермальная жидкость будет использоваться не только для выработки электроэнергии, но и для других целей. Необходимо тщательное изучение смежных проблем при многоцелевой разработке месторождения для производства электроэнергии, получения пресной воды, минерального сырья и технологического тепла. Требуется разработать, спроектировать и построить опытные установки для получения пресной воды из геотермальных жидкостей.

Извлечение геотермального тепла путем закачки в толщу пород не воды, а какой-либо другой жидкости технически вполне осуществимо. Если эта жидкость не смешивается с геотермальным раствором, то путем механической сепарации на поверхности получается чистая горячая рабочая жидкость и не требуется теплообменное оборудование.

Вследствие сильного коррозионного действия геотермальных жидкостей на оборудование необходимо исследовать ряд сплавов, способных в большей или меньшей степени выдерживать это воздействие. Для этой цели требуется информация о скоростях коррозии и роста отложений на конструкционных материалах для турбин, теплообменников, трубопроводов, клапанов и других компонентов электростанции.

По мере разработки новых геотермальных месторождений будет расширяться использование геотермальной энергии для теплофикации и охлаждения. Из-за трудностей доставки такого низкотемпературного тепла в этом случае большое значение приобретает близость потребителя к источнику. Методы использования горячей воды для обогрева и охлаждения помещений применяются уже в течение ряда лет, и дополнительных исследований не требуется.

Системы с аномально высоким давлением. Значительная часть существующих, а также разрабатываемых для применения в системах с преобладанием жидкой фазы методов непосредственно пригодна и для систем с аномально высоким давлением.

В настоящее время известна технология нагнетания больших количеств воды до давлений 24–27,6 МПа для котлов, работающих в сверхкритическом режиме на паротурбинных электростанциях на ископаемом топливе. Эта технология может быть применена для разработки водяной турбины высокого давления, которая получала бы энергию давления от геотермальной жидкости, находящейся под аномально высоким давлением, и сбрасывала бы жидкость при таких

давлениях и температурах, что ее тепловая энергия могла бы извлекаться, как из жидкости, поступающей из месторождений с преобладанием жидкой фазы. Необходимо создать опытную установку, и этот вопрос обсуждается ниже.

Геотермальные растворы, находящиеся под аномально высоким давлением, как правило, насыщены метаном. При встречающихся температурах и давлениях раствор может содержать довольно значительные количества метана. Это может служить дополнительным стимулом для разработки месторождений такого типа. Необходимо исследовать методы извлечения метана из геотермальных растворов.

Системы термоэлектрического преобразования. Необходимо исследовать термоэлектрическое преобразование и другие методы прямого преобразования тепловой энергии в электрическую (минуя турбины) на основе геотермальных ресурсов. Возможно даже необязательно производить электроэнергию непосредственно, а более целесообразно использовать тепло для производства таких химических веществ, как водород, которые затем можно использовать для генерирования электроэнергии. Следует изучить все возможные методы непосредственного использования геотермальных ресурсов, чтобы избежать некоторых из упомянутых выше проблем. Причем теоретическое обоснование любого подхода должно предшествовать долгосрочным программам исследований.

Системы с искусственно созданной трещиноватостью. Системы, созданные с помощью гидравлического разрыва с возможным последующим увеличением трещиноватости благодаря тепловому растрескиванию в процессе добычи, по-видимому, не создают особых проблем в связи с эксплуатацией месторождения в дополнение к рассматриваемым выше при условии, что закачиваемая вода является теплоносителем. Поэтому никаких специальных исследований по этим системам, очевидно, не требуется.

При создании трещинной системы с помощью ядерных взрывов в толще пород образуются радиоактивные вещества. Следует идентифицировать эти вещества и разработать способы предотвращения появления их на поверхности.

Вопросы экономической эффективности. Современные запасы топлива для производства электроэнергии весьма ограничены и будут продолжать истощаться. Такие дополнительные источники энергии, как геотермальная энергия, которые в настоящее время весьма желательны, в ближайшем будущем могут стать необходимыми для нормального социального и экономического развития страны. С этой точ-

ки зрения вопросы экономической эффективности получения электроэнергии из этого источника, возможно, менее важны, чем его наличие.

При непосредственном рассмотрении экономической эффективности геотермального производства электроэнергии отсутствие определяющих стоимость данных делает прямой расчет стоимости невозможным. Поэтому рабочая группа подошла к проблеме с точки зрения того, какой должна быть стоимость геотермальной системы, чтобы производимая электроэнергия была конкурентоспособной с электроэнергией, получаемой другими новыми методами.

В течение оставшейся части столетия из обычных способов производства энергии самым дешевым, по-видимому, будет производство электроэнергии на атомных электростанциях. Если известную часть стоимости для геотермальной электростанции сравнить с общей стоимостью производства энергии атомной станцией, полученная разница составит неизвестные компоненты стоимости производства геотермальной электроэнергии. Сюда относятся разведка геотермального месторождения, его разработка и организация добычи, стоимость испарительного оборудования, удаления твердых частиц, оборудования по снижению уровня шума, удаление отработанных жидкостей, мер по охране окружающей среды и т.д.

Используя такой метод расчета, рабочая группа получила предварительную оценку необходимых затрат на эти неизвестные компоненты геотермальной системы. Они составили 200 долл./кВт в расчете на 1980 г. и 250 долл./кВт на 2000 г.

Требуется установить соотношение между энергетическими циклами и типами месторождений. Очень важно провести моделирование систем и осуществить аналитические исследования для согласования этих элементов. Требуется также сравнить технико-экономические показатели.

Опытные станции. Как правило, прежде все необходимые исследования и разработки по созданию современного энергетического оборудования осуществлялись фирмами-производителями электроэнергии, которые затем и использовали это оборудование.

Предполагается, что фирмы-производители продолжают эту традицию и внесут необходимые капиталовложения в разработку нового оборудования, а фирмы-потребители возьмут на себя финансирование опытных станций. Единственным исключением явится финансирование опытной опреснительной станции, рассмотренной выше. Эта исключительность является результатом традиционной роли федерального правительства в деле водоснабжения.

В настоящий момент трудно предсказать с большой точностью число и мощность опытных станций, которые придется построить. Однако для расчетов принимается, что понадобится семь опытных станций мощностью по 10 МВт; две станции, использующие горячую воду, с испарителями, работающие при разных условиях; две станции, использующие горячую воду, с вторичным теплоносителем; одна станция, работающая на концентрированном геотермальном растворе; одна станция — на месторождении с геостатическим давлением; одна станция для проверки еще не известной новой системы.

На каждой геотермальной площадке должна быть оборудована испытательная лаборатория. Это позволит организовать проверку нового оборудования в течение 1–2 лет в полевых условиях по мере его разработки, исключая потребность в строительстве каждой новой станции.

Весьма вероятно, что по мере расширения наших знаний о динамике геотермальных месторождений возникнет оптимальная стратегия их разработки, которая позволит максимально повышать продуктивность месторождения с расширением рынка сбыта. Наиболее эффективной должна оказаться полностью автоматизированная система.

Влияние на окружающую среду

ЦЕЛИ

В задачу рабочей группы, занимавшейся вопросами влияния геотермальных разработок на окружающую среду, входило наметить программу исследований, необходимых для точного определения потенциального влияния, которое может оказать такая разработка на окружающую среду, и для уменьшения, исключения или контроля за возможными нежелательными последствиями.

Многие специалисты, занимающиеся вопросами окружающей среды, не без основания полагают, что геотермальная энергия, возможно, окажется самым чистым источником преобразуемой энергии, находящейся в распоряжении человека.

Геотермальные разработки обладают уникальной особенностью в том смысле, что вся деятельность, связанная с добычей ресурсов, сосредоточена в одном месте, в непосредственной близости от электростанции и другого эксплуатационного оборудования. Не существует таких вспомогательных операций, как разработка шахт, обработка топлива, транспортировка и т.п. Поэтому влияние разработки геотермальных месторождений на окружающую среду целиком определяется районом геотермальной площадки.

Однако некоторые нежелательные воздействия могут распространяться в радиусе нескольких километров от геотермального месторождения и тем самым создать угрозу в близлежащем районе. Такие воздействия необходимо изучить и найти пути решения возникающих проблем.

Поскольку в ближайшем будущем геотермальные ресурсы будут использоваться в основном для производства электроэнергии, рабочая группа сосредоточила внимание на изучении влияния такого рода разработок. Возможное нежелательное влияние, вызывающее наибольшее беспокойство, связано с отходами вредных газов и твердых частиц, с заражением почвы, опасностью оседания поверхности и землетрясения, загрязнением воды, биологическим воздействием и социальными последствиями. Необходимо сосредоточить исследования на точном определении и оценке характера таких воздействий и их размаха.

Рабочая группа уделила основное внимание таким проблемам, которые уже встретились или, вероятно, возникнут в связи с эксплуатацией ныне действующих систем, а именно геотермальных станций, работающих на сухом перегретом паре, на горячей геотермальной жидкости, пропускаемой через испарители, и систем с вторичным теплоносителем.

Было уделено меньше внимания изучению вопросов, которые могут возникнуть при многоцелевом использовании геотермального месторождения, при эксплуатации систем, находящихся под геостатическим давлением, при прямом использовании термальных вод для обогрева и охлаждения и при извлечении энергии из горячей сухой породы.

Что касается Плоушерской программы, то рабочая группа исходила из того, что в рамках этой программы влияние на окружающую среду мирного использования ядерных взрывов находится в тесном взаимодействии с разработкой геотермальной технологии, и рабочая группа некомпетентна давать рекомендации относительно возможных вредных воздействий использования ядерных взрывов в мирных целях.

НАПРАВЛЕНИЯ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Чтобы уменьшить или исключить возможные вредные влияния на окружающую среду разработок геотермальных ресурсов страны или взять их под контроль, необходимо исследовать различные вредные для окружающей среды явления, точно определить их характер, раз-

меры и возможности контроля над ними. Ниже описываются наиболее важные из них.

Выделение газов и твердых частиц. В последнее время чаще всего обсуждается вопрос о загрязнении воздуха сероводородом, сбрасываемым современными геотермальными электростанциями. Значительная часть этого газа выносится с неконденсирующимися газами из смешивающего конденсатора. Остальная часть абсорбируется циркулирующей охлаждающей водой. Часть сероводорода окисляется до сульфатов с образованием чистой серы. Непрореагировавшая часть захватывается потоком воздуха в градирне, вызывая дополнительное загрязнение воздуха.

Ведутся интенсивные исследования по изучению соединений серы, таких, как двуокись серы и сероводород, и уже разработаны промышленные процессы переработки этих отходов и доведения их до уровня, допустимого для выброса их в атмосферу. Однако необходимы дальнейшие исследования для решения проблемы загрязнения атмосферы сероводородом, выпускаемым из градирен.

Одним из подходящих решений может оказаться применение поверхностных конденсаторов и, следовательно, физическое отделение парового конденсата от охлаждающей воды. Этот подход будет связан с увеличением расходов и с трудностями обеспечения градирен водой из поверхностных или подземных источников.

Помимо сероводорода, существуют, несомненно, и другие газообразные химические вещества, например, соединения ртути, радиоактивные изотопы, такие, как ^{210}Pb и ^{222}Rn и т.п., которые присутствуют в некоторых геотермальных месторождениях и могут оказать отрицательное воздействие на окружающую среду, если допустить их свободный выброс в атмосферу.

Следует провести исследования для определения химического состава неконденсирующихся газов, извлекаемых вместе с раствором из геотермальных месторождений, и количественно оценить их допустимый уровень. На основе результатов этих исследований необходимо разработать методы улавливания и безопасного сброса этих веществ. Наряду с указанными исследованиями нужно разработать аналитические методы и соответствующую аппаратуру для управления сбросом и контроля за этим процессом.

Аналогичные исследования следует провести в отношении удаления твердых частиц. Выделение твердых частиц действующей геотермальной электростанцией не всегда легко обнаружить, тем не менее оно может иметь место. Установки со смешивающими конден-

саторами в 5 раз увеличивает концентрацию твердых частиц, поступающих с паром, в процессе испарения в градирне.

Подобно тому как продукты сброса из градирни могут содержать высокие уровни концентрации бора, мышьяка, фтористых соединений и свободного аммиака, захваченная потоком вода при выносе ее из градирни в виде капель будет содержать такие же высокие концентрации этих веществ. Вынос капель воды в атмосферу и последующий процесс испарения приводят к оседанию пыли из этих веществ в окружающей местности. Химический состав продуктов сброса пока остается таким, что эти газообразные отходы необходимо возвращать в скважину, чтобы избежать их вредного воздействия на окружающую среду.

Следует провести исследования с целью определения влияния такой пыли на окружающую среду. Можно также исследовать вопрос о механических устройствах, которые уменьшали бы утечки. Основная задача исследований заключается в том, чтобы качественно и количественно определить концентрации вредных газов и твердых частиц в отходах производств геотермального месторождения и научиться регулировать их.

Влияние на поверхность земли. Что касается проблемы загрязнения почвы, необходимо сосредоточить усилия на том, чтобы предотвратить деградацию используемых земель и обеспечить контроль над выпадением на землю твердых частиц вредных веществ на территории геотермальной площадки, с которой они затем могут распространиться по всей окружающей местности. Эти проблемы в разной степени определяются разными процессами производства.

Что касается систем с преобладанием паровой фазы, необходимо определить качественный и количественный состав вредных веществ в геотермальном паре (таких, как Hg, As, Se, ^{210}Pb) на каждой геотермальной площадке, подлежащей разработке. Нужно определить механизмы, в соответствии с которыми происходит выпадение твердых осадков, чтобы количественно оценить осадки, которые могут выпадать вместе с дождем или другими атмосферными осадками, и разработать методы контроля над выделением таких загрязнителей в атмосферу для применения их при контроле выделений на устье скважин и в местах сброса отработанных продуктов электростанции и градирни.

Для систем с преобладанием жидкой фазы необходимо оценить влияние на окружающую среду случайных утечек геотермальной жидкости продуктивной зоны, определив соединения, оседающие на по-

верхности земли, которые могут оказывать вредное воздействие на растения, лишая почву плодородия, а также входящие в цепи питания вещества, количество которых может возрасти под действием биологических факторов.

Необходимо разработать программы контроля за загрязнением поверхности земли, отложениями вредных химических веществ и возможной эрозией почвы, с тем чтобы эти программы можно было внедрить на каждой геотермальной площадке. Кроме того, необходимо создать специальное оборудование для правильного и безопасного хранения жидких и твердых отходов производства.

Изучение процессов оседания почвы. Опыт показывает, что извлечение из недр одинаковых количеств жидкости в одних районах вызывает оседание, а в других не оказывает никакого заметного воздействия. По этому вопросу накоплена обширная информация при изучении разработок месторождений нефти и подземных вод, но имеется очень мало данных в отношении геотермальных жидкостей.

Применяемые в настоящее время методы исследований в этой области, заключаются в том, чтобы сначала установить точные данные об уровне поверхности земли, измеренные в близко расположенных друг от друга точках на действующих площадках, с которых можно получить геотермальные жидкости с высокой энтальпией. В некоторых из этих районов уже существуют сети контрольно-регистрирующих скважин, которые следует создать повсеместно.

Данные, полученные в ходе изучения процессов оседания и используемые для этого методы и приспособления, могут быть применены при рекомендованных ниже других исследованиях, направленных на изучение гидродинамики и качества воды.

Опасность землетрясений. Одной из основных характеристик многих геотермальных районов является их тесная связь с участками высокой геологической активности, которая чаще всего проявляется в виде землетрясений. Изучение этого вопроса показывает, что если в области тектонического напряжения меняется давление находящейся там жидкой фазы, то при землетрясениях разломы могут изменить свое направление.

В настоящее время ведутся работы, направленные на решение многих вопросов, связанных с сейсмической активностью, и часть полученной в результате этих работ информации может быть применена к геотермальным районам. Однако необходимо создать контрольно-регистрирующие станции вблизи продуктивных геотермальных месторождений, с тем чтобы определить, не возникают ли разломы в

новых направлениях в связи с извлечением геотермальной жидкости или ее закачкой в недра месторождения.

Изучение водных проблем. Эти проблемы охватывают довольно широкую область, но рабочая группа сочла целесообразным выделить две основные проблемы: вопросы гидродинамики и вопросы загрязнения вод. При современном уровне развития гидродинамики возможность предсказания влияния разработки геотермальных месторождений на региональные запасы подземных вод и на оседание поверхности земли затруднена неумением выделить и количественно определить источники питания этих вод, изучить особенности бассейна и определить характер циркуляции подземных вод. Нужны новые данные и более дешевые методы измерений с помощью изотопов. Большой вклад в понимание этих сложных систем могло бы внести проведение на основе этих данных моделирования на вычислительных машинах.

Разработка и эксплуатация геотермальных месторождений связаны с риском загрязнения поверхностных и подземных вод геотермальными флюидами. Это явление зависит от условий конкретной геотермальной площадки, поскольку в некоторых местах растворы с высокой энthalпией характеризуются большой концентрацией растворенных в них веществ, в то время как в других местах качество геотермальных вод весьма близко к качеству используемых ныне подземных вод.

В этой области могут быть использованы аппаратура, применяемая в смежных областях при изучении оседания почв и гидродинамических исследованиях, а также полученные при этом данные, однако необходимо провести специальные исследования с целью определения химических соединений, которые могут оказывать вредное воздействие. В тех случаях, когда подобной возможности нет или когда существующие методы слишком дорогостоящи для широкого применения в полевых условиях, необходимо разработать соответствующие методы сбора и анализа проб.

Следует начать изучение химических и изотопных характеристик применительно к закачке геотермальных жидкостей, чтобы определить, действительно ли такие жидкости остаются в бассейне (месторождении), из которого они были извлечены, или же они перетекают в соседние бассейны (месторождения).

Биологическое воздействие. Существует много неизвестных аспектов возможного влияния геотермальных разработок на биосферу как в перспективных районах получения геотермального тепла, так и в находящихся в процессе разработки и эксплуатации.

В условиях чрезвычайно сложного равновесия, существующего в природе, изменения химического баланса почвы и воды, использование токсических веществ в промышленных процессах, уничтожение таких природных мест обитания, как естественные термальные водоемы и альпийские луга, нарушение циклов миграции, медленные изменения влажности, вторжение человека в ранее нетронутые районы — все это может нанести вред многим видам растительного и животного мира.

Указанные и многие другие факторы безотлагательно требуют тщательного изучения на специально выбранных типичных месторождениях с целью определения необходимых действий, направленных на эффективную защиту флоры и фауны в районах разработок.

Социальные последствия. К социальным проблемам, которые требуют дополнительных исследований в связи с разработкой геотермальных месторождений, относятся проблемы шума и землепользования. Целый ряд этапов разработки геотермального месторождения связан с высоким уровнем шума. Большую часть источников шума можно контролировать с помощью современной технологии, но такие процессы, как выпуск флюида из скважин с целью очистки и испытания испарительной системы при разработке месторождения с преобладанием жидкой фазы, создают необычайные трудности в борьбе с шумом из-за присутствия капель воды в паре, находящемся под высоким давлением.

Процесс с мгновенным вскипанием находится сейчас на стадии экспериментальной разработки, и желательно как можно раньше создать эффективные устройства глушителей, чтобы этот потенциально важный производственный процесс при его внедрении не встретил сопротивления со стороны общественности и мог бы быть усовершенствован.

К проблемам землепользования, связанным с разработкой геотермальных полей, относятся спорные вопросы использования земли, сохранения ее пригодности в дальнейшем, а также возможности использования одной и той же территории для разных целей. Производственные геотермальные процессы являются промышленными по своей природе, а геотермальные месторождения, как правило, расположены в непромышленных районах. При современном уровне техники геотермальные разработки из-за шума, запаха и нарушения ландшафта несовместимы с жилыми районами или зонами отдыха. Возникают также проблемы в связи с разработкой таких районов, в которых территория в пределах месторождений уже используется в других целях.

Крайне необходимо проведение социологических, экономических исследований и изучение вопросов планирования с целью выявления отношения общества к справедливому решению возникающих в таких случаях конфликтов в связи с землепользованием. В недолгой истории эксплуатации геотермальных месторождений США уже известны случаи таких споров, и, если будет принято решение о разработке этого источника энергии со скоростью, необходимой для удовлетворения потребностей в энергии, которую можно из данного источника получить, следует найти способ быстрого разрешения таких конфликтов. Дальнейшее развитие технологии позволит смягчить промышленный облик разрабатываемых геотермальных месторождений и поможет решить проблему споров вокруг использования земли.

Проблема дальнейшего использования земли на территории геотермальных разработок связана со значительным изменением физического состояния этой территории, вызванным выемкой грунта, с уплотнением и разрыхлением почвы, которые имеют место при строительстве основания буровых скважин, подъездных дорог и площадки для электростанции.

Необходимо провести исследование и разработать новые методы эксплуатации месторождений, которые позволят уменьшить воздействие геотермальных разработок на территорию района. Использование уже существующих прогрессивных методов направленного бурения сделает возможным расположение нескольких скважин на базе одного основания, что значительно уменьшит физическое воздействие на территорию участка. Кроме того, этот метод может уменьшить нарушения ландшафта, обусловленные огромным числом буровых оснований и сложной системой трубопроводов, характерных для современных геотермальных площадок.

Организационно-правовые вопросы

ЦЕЛИ

В задачу рабочей группы, занимавшейся организационно-правовыми вопросами, входило определение объема исследований организационно-правовой стороны дела, включая выработку организационных, юридических и уставных положений, которые позволяют разрабатывать геотермальные источники с гарантией безопасности, экономической выгоды, сохранения окружающей среды и интересов всех участвующих сторон.

Участвующие стороны представлены населением, выступающим в качестве конечного потребителя, промышленными фирмами и дру-

гими организациями, выступающими в качестве разработчиков месторождения или посредников-потребителей, а также местными властями, администрацией штатов и учреждениями федерального правительства, выступающими в качестве планирующей или контролирующей стороны. Рабочая группа рекомендует создать при президенте специальный комитет, который занялся бы изучением достоинств и недостатков различных организационных структур.

Необходимо дать оценку существующих законов и постановлений с целью выработки в необходимых случаях требуемых изменений. Нужно изучить процессы федерального планирования и регулирования с целью усиления эффективной координации и других усовершенствований организационной стороны дела. Ниже приводятся более подробные обсуждения и рекомендации.

НАПРАВЛЕНИЯ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Чтобы обеспечить оптимальную разработку геотермальных ресурсов, необходимо решить ряд организационно-правовых проблем. Ниже описываются некоторые из них.

Определение, принадлежность и статус геотермальных ресурсов.

Геотермальный пар представляет собой особую категорию ресурсов. Он может представлять интерес с точки зрения содержания в нем энергии, с точки зрения получения из него воды и с точки зрения извлечения из него минерального сырья. Поэтому его нельзя отнести ни к разряду источников воды, ни к разряду источников минерального сырья, и при установлении связанных с этим ресурсом правовых определений нельзя игнорировать его ценность в качестве источника энергии.

Подобно подземным водам, циркулирующие геотермальный пар или горячая жидкость могут пересекать границу частного владения, унося с собой накопленную энергию и растворенные минеральные вещества. Эксплуатация геотермального района в одном месте может неблагоприятно отразиться на возможности его эксплуатации на земле, принадлежащей другому владельцу. Это создает ряд юридических проблем, и, как о том свидетельствует сложность существующих ныне юридических постановлений в отношении воды, эти проблемы решить не так-то просто.

Возможность использования геотермального пара одновременно для получения энергии, воды и минерального сырья связана с вопросом о multifunctionality данного источника и распределении ассигнований между несколькими источниками.

Необходимость координирования научно-исследовательских работ. Ниже приводится список различных подразделений государственных учреждений (на уровне федерального правительства и органов управления штатов) и частных ведомств, которые так или иначе заинтересованы в исследовании, планировании и разработке геотермальных ресурсов. Список свидетельствует об отсутствии единой программы исследований в масштабах страны.

Хотя, возможно, в настоящий момент и не происходит дублирования исследований, оно станет неизбежным, если не будут приняты меры по координации общенациональных усилий. Без эффективной координации не может быть и речи о реально выполнимых программах. Только на уровне федерального правительства существует свыше десятка ведомств, имеющих программу исследований и разработок на стадии планирования или на стадии осуществления.

Необходимо разработать некоторые вопросы о конкретном распределении обязанностей между частным сектором и федеральным правительством (на федеральном уровне и на уровне штатов) и придать им определенную структурную форму, чтобы частный сектор и правительство могли совместно осуществлять программу, эффективную и экономически выгодную с точки зрения интересов всей страны. Ниже приводится список учреждений, занятых исследованиями и разработками геотермальных ресурсов.

Федеральные учреждения

Министерство внутренних дел

Геологическая служба США

Бюро землепользования

Управление мелиорации

Горнорудное управление

Бюро по вопросам зон отдыха

Бюро рыболовства и охоты

Ведомство опреснения соленых вод

Отдел исследований водных ресурсов

Комиссия по атомной энергии

Отделение прикладной технологии

Отделение научных исследований

Национальный научный фонд

Секция наук о земле

Программа исследования проблем энергетики и технологии

Федеральная комиссия по энергетике

Министерство финансов

Министерство обороны

Управление перспективных исследовательских проектов

Центр по разработке военно-морских вооружений

Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства

Агентство по охране окружающей среды

Государственный департамент

Бюро по науке и технике

Административно-бюджетное бюро

Конгресс

Комиссия по внутренним и островным территориям (при сенате и палате представителей)

Объединенная комиссия по атомной энергии

Учреждения штатов

В различных штатах различные учреждения, но по сути дела параллельные федеральным учреждениям.

Частный сектор

Научно-исследовательские организации

Университеты

Промышленность

Частные научно-исследовательские лаборатории

Промышленность

Производящие фирмы (нефтяные компании)

Потребляющие фирмы (сфера обслуживания и т.д.)

Взаимодействие между ведомствами. На разработку геотермальных ресурсов распространяются соответствующие постановления федерального правительства, органов управления штатов и графств. Однако в некоторых штатах и графствах, где обнаружены геотермальные ресурсы, до сих пор не созданы и не введены в действие постановления, которые бы полностью охватывали данный процесс. По мере развития геотермальной индустрии и по мере все большего вовлечения в руководство ею соответствующих организаций на каждом административном уровне может возникнуть ситуация, при которой изданные в разное время постановления не только перекроются, но в некоторых случаях окажутся в противоречии друг с другом. Проблема грозит стать серьезной и требует соответствующего изучения.

Сбор и распространение информации. Для развития реалистической общенациональной программы весьма важными являются координированные усилия, направленные на быстрейший сбор и распространение имеющейся информации о работах по исследованию и раз-

работке геотермальных ресурсов. Собранная информация должна быть проверена, оценена и должна стать доступной всем заинтересованным сторонам.

Вопросы международного сотрудничества. Следует рассмотреть несколько вопросов, которые имеют международное значение. К ним относятся расположение геотермальных месторождений вдоль государственных границ или пересечение ими границ, возможные нежелательные последствия геотермальных разработок для окружающей среды или вытекающие из эксплуатации месторождений, находящихся вблизи государственной границы; разработка и осуществление совместных международных проектов, таких, как предлагаемый ныне проект в рамках совместной советско-американской комиссии по научно-техническому сотрудничеству, и потребность в обмене информацией, который обеспечил бы доступ к новейшим данным в этой области. Большая работа в этом направлении проделана Организацией Объединенных Наций, вклад которой следует тщательно изучить.

Вопросы кадров. Поскольку в США разработка геотермального источника энергии является новой областью, большинство людей, занимающихся этой работой, пришли сюда из других областей науки и техники. Лишь в очень немногих учебных заведениях разработаны программы исследований геотермальных ресурсов, позволяющие подготовить специалистов этого профиля. Необходимо исследовать вопрос о желательности разработки программ, включающих ряд смежных дисциплин, специализированных курсов, а также создания научно-исследовательских центров.

Проблемы, стоящие перед частным сектором. Частные фирмы несут в конечном счете ответственность за освоение геотермальных ресурсов с целью производства электроэнергии и тепловой энергии для теплофикации. В связи с этим перед ними встает множество проблем, которые необходимо рассмотреть при разработке и претворении в жизнь общенациональной программы. К этим проблемам относятся: подготовка документации о влиянии на окружающую среду и получение соответствующего поэтапного подтверждения со стороны комиссии по охране общественно полезных ресурсов в соответствии с существующим ныне порядком; обращение за поддержкой к правительственным организациям с целью выявления экономически выгодных ресурсов; взаимодействие с правительственными организациями при разработке совместных программ и соответствующих договоренностей об аренде этого источника энергии; создание эффективной промышленной ассоциации для представления интересов но-

вой области на общенациональном уровне; рассмотрение экономического воздействия времени, требуемого для разработки и установления продолжительности жизни источника.

ЗАКОНОДАТЕЛЬНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, РЕГУЛИРУЮЩИЕ ГЕОТЕРМАЛЬНУЮ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

В общем правила разработки данной отрасли промышленности фактически сводятся к ряду запрещений. Такое положение весьма естественно, если учесть, что эта отрасль находится на раннем этапе развития и всякого рода неясностей очень много. Чтобы сделать разработку геотермального источника энергии не только возможной, но и выгодной в достаточно короткий срок, необходимо провести тщательное рассмотрение физических, экономических и социальных аспектов производства геотермальной энергии.

Землепользование. Необходимо изучить существующую политику в отношении использования геотермальных земель. Следует рассмотреть другие полезные применения геотермальной жидкости наряду с ныне преобладающей выработкой энергии (опреснение воды и производство минерального сырья). Независимо от конечного продукта геотермального производства следует рассмотреть вопросы о регулировании местоположения скважин.

Например, необходимо выяснить, следует ли располагать скважины по сетке или бурить куст наклонных скважин с целью уменьшения расстояния между скважинами. Следует выяснить, прокладывать ли трубопровод для геотермальной жидкости на поверхности земли или на некоторой глубине.

Нужны критерии как основа для выработки конкретных правил разработки. Потребуется примирить требования геотермального производства с использованием земли по другому назначению. Необходимо изучить и сформулировать политику и методы разрешения конфликтов геотермального производства с использованием земли под пастбища, как места обитания флоры и фауны, для выращивания строительного леса и т.д.

Разведка и добыча. Некоторые методы разведки (например, геофизические и геохимические) оказывают определенное воздействие на землю. Это воздействие следует изучить, чтобы разумно управлять процессом разведки и последующей разработкой и организацией добычи из геотермального месторождения.

В настоящее время для разведки, разработки и эксплуатации геотермального месторождения требуется около 40 различных разре-

ний и лицензий. При строительстве электростанции, линий передач и химических установок требуется еще больше разного рода разрешений на уровне федерального правительства, органов управления штатов и графств. Многие из этих документов дублируют друг друга, по крайней мере частично. Не во всех случаях разработана система обеспечения выполнения действующих правил на всех уровнях администрирования.

Вопросы финансирования и строительства. Необходимо изучить методы финансирования и взаимоотношения между производителем геотермального продукта и потребителем, таким, как электрические фирмы. Возникают конфликты между электрической фирмой, которая покупает пар, и арендатором земли в районах, где земля сдается в аренду и права на аренду передаются по наследству. Ситуация еще более осложняется в тех случаях, когда предполагается многоцелевое использование месторождения.

Для учета амортизации капиталовложений необходима реалистическая оценка возможного срока эксплуатации геотермального поля. В графстве Сонома шт. Калифорния фирмы "Магма пауэр энд юнион ойл" рассматривает геотермальный пар как газ, и для него действуют правила обложения налогом, принятые в отношении природного газа. Необходимо определить, насколько такое положение может быть распространено на другие геотермальные поля.

Правила эксплуатации. Существующие правила на уровне федерального правительства, органов управления штата и местных властей распространяются на электростанции, принадлежащие частным акционерным обществам, а также на электростанции, совладельцами которых являются государство, штат или местные власти. Электростанциями, полностью находящимися в общественном владении, по сути дела распоряжаются местные органы власти. Необходимо примирить существующие в этой области противоречия.

Передача энергии. По мере роста производства электроэнергии территория США покрылась сетью линий передач. В одной и той же сети отдельные линии передач могут принадлежать разным компаниям или находиться в совместном владении ряда компаний. В некоторых случаях линия передачи может находиться в совместном владении акционерного общества и федерального правительства.

Возможно возникновение трудностей в тех случаях, когда небольшая национальная электрокомпания имеет возможность разрабатывать достаточно удаленное геотермальное месторождение. В этих случаях передача энергии становится проблемой, поскольку строи-

тельство собственной линии передачи не по средствам такой небольшой фирме. С другой стороны, поскольку по ряду причин национальные компании часто не имеют возможности или не хотят пользоваться линией передачи совместно со своими конкурентами, такие небольшие национальные компании не имеют в своем распоряжении средств передачи энергии.

Продажа электроэнергии. Правила продажи электроэнергии зависят от того, кому принадлежит производящая ее электростанция. Электростанция, принадлежащая местным властям, устанавливает свои собственные цены на электричество. Продажа электричества, производимого частными электростанциями, а также совместно национальными и частными фирмами, регулируется федеральным правительством и органами управления штатов и местными властями. Если электричество, производимое такими станциями, закупается оптом с целью перепродажи, то сделки регулируются Федеральной комиссией по энергетике или эквивалентным ей учреждением и местным муниципалитетом. Такое положение дел требует пересмотра с тем, чтобы правила продажи не содержали противоречий и были применимы к геотермальному источнику энергии, поскольку геотермальная энергия не подлежит транспортировке.

Урегулирование межведомственных проблем. Самым низким административным уровнем являются органы власти графства, в компетенцию которых входит регулирование землепользования с помощью выделения зон и определения того, какие объекты могут быть возведены в той или иной зоне. Кроме того, в обязанности администрации графства входит регулирование тех действий, которые могут иметь последствия для окружающей среды, и эти органы могут принимать на себя обязанности, которые не были взяты на себя администрацией штата.

Федеральное правительство и администрация штатов как возможные владельцы земель графства вынуждены считаться с его постановлениями. В тех случаях когда соответствующие постановления не были вынесены федеральным правительством, администрация штата должна руководить геотермальными разработками на территории всего штата, за исключением тех вопросов, которые являются компетенцией администрации графства, например планирование землепользования. Постановления, вынесенные федеральным правительством относительно развития геотермальных источников на федеральных землях, должны учитывать существующие постановления штата, которые могут относиться к этой территории.

ВОПРОСЫ ЗАКОНОДАТЕЛЬСТВА

Хотя закон об использовании геотермального пара от 1970 г. вступил в силу, из-за проблем, связанных с законами об охране окружающей среды и неоднозначных решений суда, а также административных трудностей типа возникших в ноябре 1972 г., не было принято никаких постановлений для осуществления этого закона. В связи с этим не было заключено договоров об аренде геотермальных месторождений на федеральных землях, и закон до сих пор не проверен на практике. Однако промышленные разработки со времени принятия закона и дальнейшие изучения и анализ свидетельствуют о том, что неплохо было бы рассмотреть дополнительные или новые законодательные меры в связи со следующими вопросами.

Применение законов, относящихся к использованию воды и химических веществ. Необходимо решить вопрос о том, считать ли геотермальный пар с юридической точки зрения источником минерального сырья или источником воды. Закон 1970 г. не дает точного ответа на этот вопрос, и, хотя он предусматривает заключение договоров на добычу "геотермального пара и связанных с ним геотермальных ресурсов" как таковых, ответы на ряд вопросов, связанных с разработкой геотермального пара, зависят от того, будет ли применен закон о минеральном сырье или закон о воде.

Например, как решить вопрос о том, кто имеет право на воду, оставшуюся после истощения энергетического потенциала и извлечения побочных продуктов. Статья 9 закона об использовании геотермального пара предусматривает распространение закона штата о воде на ее эксплуатацию и использование, но не касается вопроса о правах на воду.

В формулировке самого закона заключено признание того, что основной вопрос остается без ответа. Согласно статье 21 (б), требуется, чтобы в тех случаях, когда право на пользование землей с расположенным под ее поверхностью геотермальным месторождением перешло от федерального правительства, но права на разработку минерального сырья сохранены за последним, генеральный прокурор должен обратиться с запросом в федеральный суд вынести частное определение о том, включает ли право на разработку минерального сырья также и геотермальные ресурсы. Такая акция должна предприниматься, причем единожды, после доклада министра внутренних дел, если он считает, что сдача в аренду земель для разработки геотермального месторождения, является необходимой.

Вопрос об исчерпаемости геотермальных ресурсов. Чрезвычайно важно с точки зрения обложения налогом решить вопрос о том, является ли геотермальный пар восполняемым или истощающимся источником.

Как отмечалось выше, федеральная служба налогообложения рассматривает геотермальный пар, добываемый в долине Больших Гейзеров в Калифорнии, как газ, что дает право производителям на налоговую скидку на истощение природных ресурсов, составляющую 22,5%. Однако было бы желательно, чтобы такое положение было закреплено законодательно.

Объединение земель. Статья 18 данного закона санкционирует добровольное объединение земель арендаторами в целях сохранения месторождения и предоставляет министру внутренних дел право требовать объединения включением соответствующей оговорки в соглашение об аренде. Однако такое обязательное объединение распространяется естественно только на федеральные территории. Объединение земель, находящихся во владении федерального правительства, штата или частного лица, санкционируется, но не является обязательным. Объединение земель в пределах одного и того же месторождения представляется желательным для сохранения и эффективной эксплуатации месторождения. Требуется сотрудничество с администрацией штата.

Стимулирование промышленных фирм. Закон 1970 г. о геотермальном паре основан на представлении о том, что разработка геотермальных ресурсов на федеральных землях осуществляется частными предпринимателями. Однако данная область промышленности является новой и не располагает достаточным количеством экономических данных, на основе которых можно принимать решения. Начальные капиталовложения достигают колоссальных сумм, а риск при существующем уровне знания и опыта очень велик.

В связи с этим крайне желательно заинтересовать частных предпринимателей разработкой этого столь необходимого для страны природного ресурса. С этой целью можно применить систему скользящей шкалы отчислений за право разработки недр вместо системы единовременной скидки.

При установлении цен в условиях конкуренции такая система была бы более благоприятной для предпринимателей с трех точек зрения: она потребовала бы меньших начальных капиталовложений частного капиталовладельца, правительство внесло бы свой вклад в успехи разработки, а кроме того, в этой разработке национальных бо-

гательств страны смогли бы участвовать лица, владеющие ограниченным капиталом.

Другим способом стимулирования частной инициативы могла бы явиться договоренность, согласно которой правительство гарантирует частному предпринимателю в случае потери его капиталовложений возмещение до 50%. Третьим способом поощрения могло бы быть предоставление кредита на покрытие расходов арендатора на исследования и разработки в обмен на отчисления за право разработки недр, срок пользования и ограничения площади. Необходимо изучить эти и другие возможные способы поощрения частной инициативы для осуществления целей, которые преследует закон 1970 г.

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ

Для выполнения программы научных исследований национальных геотермальных ресурсов основное внимание следует уделить выбору тех учреждений, которые могли бы решить поставленные выше задачи: выбрать методы разведки, оценить геотермальные ресурсы, определить методы разработки месторождения и его эксплуатации, разработать технологию производства и оценить экономическую эффективность, а также возможное воздействие на окружающую среду.

Скорейшее разрешение проблемы нехватки энергии, нависшей над страной сегодня, столь же необходимо, сколь необходимо было проведение ядерных исследований в сороковые годы или исследования в области космонавтики в шестидесятые, когда было решено, что для удовлетворения нужд страны необходимо создать новый, единственный в своем роде федеральный организационный орган.

Следует изучить вопрос о возможной структуре такого органа и выбрать подходящее учреждение, единственной или главной функцией которого было бы осуществление программы геотермальных исследований. Следует предусмотреть, чтобы такая организация, нацеленная на выполнение одной задачи, была бы самостоятельной, но действовала бы согласованно с уже существующими учреждениями федерального правительства, штата и графства.

В настоящее время в разработке общенациональной геотермальной программы участвуют не менее девяти исполнительных отделов и независимых федеральных агентств. Необходимо изучить работу этих организаций, чтобы определить, не следует ли внести каких-либо улучшений в такие вопросы, как обеспеченность квалифицированными техническими и юридическими кадрами, определение первоочередности задач внутри ведомств, планирование, финансирование, ру-

ководство и координация всей деятельности, связанной с геотермальной программой. Совершенно очевидно, что для осуществления координированной, хорошо организованной и эффективной общенациональной программы необходимо покончить с существующей ныне раздробленностью.

Хотя фактическое осуществление комплекса научно-исследовательских работ, направленных на изучение геотермальных ресурсов, вполне может находиться в руках частных компаний, учебных заведений, национальных лабораторий и вновь создаваемых научно-исследовательских центров, субсидирование, общее руководство, выбор направления исследований, а также служба обеспечения должны быть сосредоточены в одном федеральном учреждении, а не распределяться по нескольким.

Ниже перечислены далеко не все функции службы обеспечения: планирование бюджета и программы, анализ эффективности затрат, бухгалтерия и контролирование расходов, сбор и распространение научно-технической информации, вопросы охраны авторских прав, программы информации общественности и завоевания общественного мнения, оценка влияния на окружающую среду и соответствие закону об охране окружающей среды, совместное планирование федеральным правительством и промышленными фирмами направлений исследований и решение административных вопросов, вопросы координации и кооперации федеральных учреждений и учреждений штатов, международный обмен информацией и совместные международные проекты, подготовка научных кадров (создание учебных программ научно-технической подготовки), программы выработки законоположений, регулирующих координационные и консультативные функции, вопросы связи с конгрессом, руководство геотермальными полевыми исследованиями и экспериментальными центрами, техническая консультативная помощь контрольным органам, ведомствам управления и координация с другими федеральными агентствами, выполняющими родственные функции.

Возможна разная степень централизации, чтобы охватить все эти общие функции и службы. Следует рассматривать все варианты учреждений, часть из которых перечислена ниже.

Комиссия по геотермальной энергии. Новое независимое учреждение, организованное по специальному постановлению конгресса, подчиняющееся непосредственно президенту и сочетающее в себе функции и обязанности всех других федеральных агентств, которые в настоящее время связаны с исследованием и разработкой геотермальных ресурсов.

Корпорация по геотермальным ресурсам. Квазиправительственная корпорация, организованная по специальному постановлению конгресса и субсидируемая совместно правительственными ассигнованиями, частным капиталом или за счет выручки от эксплуатации. Аналогичными организациями являются "Тенесси валли осорити", "Комьюникейшнс сэтеллит корпорейшн" и "Бонвилль пауэр администрейшн".

Объединенная служба по геотермальным исследованиям и разработкам. Отдельная служба, которую совместно финансируют и обеспечивают персоналом федеральные агентства-участники и которая существует благодаря формальной договоренности этих организаций или согласно распоряжению правительства. Служба должна исполнять все обязанности отдельного агентства, причем бюджет и фонды она будет получать через агентства-участники. В качестве примеров такой службы можно назвать "Спейс ньюклиэр пропалшн оффис", "Оффис ов нейвал ризкторс" и "Оффис фор интернэшнл декейд фор оушин эксплорейшн".

Национальный геотермальный координационный совет. Этот совет создает возможность формального координирования федеральных программ, утвержденных постановлением правительства. В обязанности совета не входит составление программ или выполнение конкретных задач.

Специальный межведомственный координационный комитет. Этот комитет продолжает деятельность существующей специальной федеральной группы, которая участвовала в подготовке доклада "Оценка ресурсов геотермальной энергии". Комитет состоит из участников-добровольцев, не имеющих определенных формальных обязанностей.

Национальный совет по разработке геотермальных ресурсов. Это совет при президенте для определения политики, координации и наблюдения за проведением национальной программы исследований геотермальных ресурсов, которая осуществляется несколькими заинтересованными агентствами. Аналогичные советы существуют по вопросам национальной безопасности, внутренних и внешних дел.

Национальные лаборатории для проведения полевых исследований в геотермальных районах. Это лаборатории, созданные для исследования различных типов геотермальных ресурсов. Следует использовать множество различных методов и различных технологий для обнаружения, оценки, составления карт (в трех измерениях) геотермальных месторождений каждого типа и проведения на них экспериментов с целью разработки и проверки методологии и технологии для обнаружения, оценки и эксплуатации аналогичных месторождений.

Если каждый тип месторождения будет исследоваться на примере одного месторождения, то кооперация различных исследовательских проектов позволит сэкономить деньги и время, необходимые на осуществление исследования в целом. Проекты по исследованию и разработке, проводимые промышленностью, правительством и университетами и представляемые в Научно-консультативный совет по развитию геотермальных ресурсов на одобрение, будут осуществлять лаборатории, находящиеся в совместном ведении Геологической службы США и Национального научного фонда.

Кроме организационного объединения всех геотермальных исследований и разработок на федеральном уровне, необходимо создать национальную ассоциацию промышленных фирм, занятых геотермальными разработками. По идее это должна быть ассоциация, существующая на частные средства, которая не призвана заменить ни одно из перечисленных выше учреждений. Создание ее крайне желательно для обеспечения эффективного представительства данной отрасли на общенациональном уровне и осуществления связи с федеральной геотермальной организацией или организациями.

РЕКОМЕНДАЦИИ

Рекомендуется создать комиссию для изучения всех организационных вопросов, которая подготовит доклад непосредственно президенту США. Для создания такой комиссии, обладающей соответствующим статусом для эффективных контактов с органами власти и решения правовых вопросов на уровне федеральных министерств, потребуется рабочая группа, составленная из высококвалифицированных специалистов широкого профиля.

В задачу комиссии должно войти исследование существующих федеральных структур и отдельных групп, ответственных за осуществление различных аспектов исследования и разработки геотермальных ресурсов, оценка возможности и эффективности таких компонентов и рекомендации организационных мер, которые бы способствовали осуществлению действенной национальной программы освоения геотермальных ресурсов.

Литература

1. Geothermal Energy, A National Proposal for Geomothermal Resources Research, PB 222,326, 1972.

Оглавление

Предисловие редактора перевода	5
Предисловие	7
Введение	8
Глава 1. Геотермальные ресурсы как один из перспективных источников энергии	9
История освоения геотермальных ресурсов	11
Характеристики систем	13
Общие вопросы	16
Размещение и доступность геотермальных месторождений	17
Оценки геотермальной энергии	18
Вид извлекаемой энергии	20
Значения к.п.д.	21
Ограничения по размерам	21
Производительность скважин и установок	22
Продукты, вызывающие загрязнение окружающей среды	22
Проблемы освоения геотермальных ресурсов	25
Оценки стоимости	32
Воздействие на окружающую среду	36
Преимущества и недостатки	38
Новые методы разведки	38
Исследовательские работы и освоение геотермальных ресурсов в США	41
Геологическая служба США	42
Управление мелиорации США	44
Ведомство опреснения вод	46
Горнорудное управление	47
Бюро землепользования	48
Национальный научный фонд	49
Комиссия по атомной энергии	50
Министерство обороны США	52
Национальное управление по авионавигации и исследованию космического пространства (НАСА)	53
Роль учреждений американских штатов	54
Роль частных фирм	54

Оценки предельных запасов геотермальной энергии	55
Порядок сдачи в аренду земель с геотермальными ресурсами в США	62
Федеральные земли с геотермальными ресурсами	62
Земли с геотермальными ресурсами, находящиеся в частном пользовании	65
Сведения об основных геотермальных установках	67
Исландия	67
Италия	69
Новая Зеландия	71
Япония	73
Долина Больших Гейзеров (шт. Калифорния, США)	78
Мексика	81
Сальвадор	82
Литература	63
Глава 2. Сухие геотермальные месторождения	87
Обычные методы бурения	90
Современное состояние	90
Направления дальнейших исследований	92
Глубокое роторное бурение	93
Современное состояние	93
Направления дальнейших исследований	110
Технологические трудности и ограничения	113
Современное состояние	113
Направления дальнейших исследований	117
Совершенствование современных методов бурения	117
Современное состояние	117
Используемые буровые установки	121
Направления дальнейших исследований	122
Новые методы	122
Современное состояние	122
Направления дальнейших исследований	136
Развитие геотермальной энергетики	136
Один из методов получения геотермальной энергии	136
Бурение, создание гидравлического разрыва и обеспечение циркуляции воды	137
Опытно-промышленная ГеоТЭС	140
Эксперимент по определению возможности сооружения ГеоТЭС	142
Гидравлический разрыв и рост трещин под действием термических напряжений	142
Экономика	146
Данные по эксперименту, касающемуся создания искусственного геотермального месторождения и ГеоТЭС	147
Использование на месторождении неводных жидкостей	148
Литература	149
Глава 3. Плоушерская программа использования ядерных взрывов	150
Плоушерская программа извлечения геотермального тепла	150

Требования к площадке и геологические условия	155
Разработка источников тепла	157
Результаты ядерного взрыва	158
Проблемы бурения	173
Вопросы безопасности и воздействия на окружающую среду	175
Общественное мнение	183
Извлечение тепла	184
Потери теплоносителя и проницаемость	185
Режимы течения	187
Теплоотдача от трубообразной полости	187
Извлечение тепла из трещиноватой области	188
Эксплуатация электростанции	188
Качество пара	188
Термодинамика системы	202
Гипотетический случай выброса	216
Проблемы, связанные со строительством сейсмостойких станций	222
Патент Диксона [11]	227
Плоушерская программа стимулирования естественных геотермальных ресурсов [12]	227
Литература	230
Глава 4. Три экспериментальных исследования	232
1. Образование накипи при моделировании геотермального раствора	232
Описание установки	232
Особенности эксплуатации установки	235
Программа испытаний	236
Результаты исследования теплопередачи	239
Образцы	243
Падение давления	244
Результаты и выводы	245
2. Анализ воды из скважин в районе Уайракей	246
3. Химический состав геотермального пара, получаемого при реализации Плоушерской программы	247
Описание эксперимента	248
Обсуждение результатов	253
Выводы	259
Литература	260
Глава 5. Исследование геотермальных ресурсов Калифорнии	261
Природа ресурсов	261
Размеры ресурсов	265
Долина Больших Гейзеров	266
Долина Импириал-Валпи	267
Район озера Моно-Лейк	270
Методы эксплуатации	270
Сухой пар	270
Выработка электроэнергии на базе геотермальных вод	272
Опреснение геотермальной воды	273

Схема электрогенераторной установки с замкнутым циклом	275
Охлаждение	276
Общий анализ системы и стоимость выработки электроэнергии с использованием сухого пара	277
Воды для закачки в недра	280
Влияние на окружающую среду	283
Использование земли	283
Сбросные воды	283
Оседание земли	286
Сейсмическая активность	286
Загрязнение воздуха	287
Отвод тепла	288
Выбросы из скважин	289
Потенциальные ресурсы	290
Литература	296
Глава 6. Способы получения энергии из горячих геотермальных растворов	297
Метод полного потока	297
Распространенность и характеристика ресурсов геотермальных растворов	300
Мощность и размещение месторождений горячих геотермальных вод в Солтонской впадине	301
Химический состав геотермальных растворов	304
Гидростатическое давление геотермальных растворов	306
Оценка производительности скважин	307
Механизм получения геотермальной тепловой энергии в Солтонской впадине	309
Термодинамический анализ	311
Системы турбин	312
Один из возможных проектов	314
Химические и коррозионные факторы	316
Физические и тепловые свойства геотермальных растворов	316
Коррозия	318
Образование накипи	319
Насыщаемость геотермального раствора	319
Конструкция крепления скважин	322
Влияние на окружающую среду	324
Оценки стоимости	324
Предположения	325
Капитальные затраты	325
Эксплуатационные расходы	327
Оборот капитала и рентабельность	328
Метод фирмы "Спэрри рэнд"	330
Литература	337
Глава 7. Изучение возможности освоения трех геотермальных районов США	338
Техас	338

Месторождения с аномально высоким давлением	339
Оценка глубинных параметров для выбранных участков	342
Описание участка Себастиан	344
Описание участка Порт-Мансфилд (район Тэнвриас)	349
Расчет дебита скважин месторождений	352
Проект опытной ГеоТЭС	356
Калифорния	357
Участок Пойнт-Мугу	358
Участок Туэнтинайн-Палмс	359
Участок в районе озера Чайна	361
Айдахо	361
Предпосылки	361
Состояние проекта	364
Литература	365
Глава 8. Предложенная программа исследований	367
Разведка гвотермальных ресурсов	368
Цели	368
Направления дальнейших исследований	369
Оценка гвотермальных ресурсов	374
Цели	374
Направления дальнейших исследований	374
Разработка месторождения и его эксплуатация	379
Цели	379
Направления дальнейших исследований	380
Методы эксплуатации и экономическая эффективность	384
Цели	384
Направления дальнейших исследований	385
Влияние на окружающую среду	391
Цели	391
Направления дальнейших исследований	392
Организационно-правовые вопросы	396
Цели	398
Направления дальнейших исследований	399
Законодательные положения, регулирующие гвотермаль-	
ную промышленность	403
Вопросы законодательства	406
Разработка программы	408
Рекомендации	411
Литература	411